

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FILOZOFSKI FAKULTET

Odsjek za arheologiju

Ivana Lučića 3

Valerija Gligora

KORIŠTENJE 3D MODELA U ARHEOLOGIJI

Diplomski rad

Mentor:

dr. sc. Ina Miloglav

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem mentorici, dr. sc. Ini Miloglav, na pomoći i savjetima prilikom pisanja diplomskog rada. Također, zahvaljujem dr. sc. Ani Azinović Bebek te Andreju Janešu na ustupanju terenske dokumentacije, a još važnije od toga, na ukazanom povjerenju te prilici da naučim raditi ono što me zanima. Zahvaljujem i svojoj obitelji i prijateljima.

SADRŽAJ

POJMOVNIK.....	1
POPIS KRATICA	2
1. UVOD	4
2. RAZVOJ ARHEOLOGIJE I TEHNOLOGIJE.....	5
2.1. RAZVOJ RAČUNALA.....	5
2.2. VIZUALIZACIJA I RAČUNALNA GRAFIKA	7
2.3. FOTOGRAFIJA I FOTOGRAMETRIJA	10
2.4. VIRTUALNA ARHEOLOGIJA	11
3. 3D MODELI U ARHEOLOGIJ I	13
3.1. 3D DIGITALIZACIJA	13
3.1.1. 3D SKENERI.....	13
3.1.2. 3D MODELI TEMELJENI NA FOTOGRAFIJAMA	18
3.1.3. ARHEOLOŠKA DOKUMENTACIJA I 3D MODELI	21
3.2. 3D REKONSTRUKCIJA	28
4. PREDNOSTI I NEDOSTACI 3D MODELA	35
4.1. 3D DIGITALIZACIJA	35
4.2. 3D REKONSTRUKCIJA	38
5. ZAKLJUČAK	41
POPIS SLIKA	43
POPIS LITERATURE	45

POJMOVNIK

3D digitalizacija	postupak kojim se prostorni oblik nekog predmeta, objekta ili nalazišta određuje (snima) i zapisuje u digitalnom obliku
3D model	trodimenzionalni matematički prikaz nekog objekta
3D modeliranje	proces stvaranja matematičkog prikaza trodimenzionalnog oblika nekog predmeta
3D rekonstrukcija	digitalna rekonstrukcija arheoloških nalazišta ili nalaza
3D vizualizacija	grafički prikaz stvoren uz pomoć 3D računalnog programa
digitalna arheologija	korištenje informacijske tehnologije i digitalnih medija u arheologiji. Računalna arheologija i virtualna arheologija su podgrupe digitalne arheologije (<i>eng. digital archaeology</i>)
oblak točaka	skup točaka koje su iz daljinskih i kutnih mjera pretvorene u Kartezijev (x, y, z) koordinatni sustav (<i>eng. point cloud</i>)
računalna arheologija	primjena kvantitativnih metoda u arheologiji uz pomoć računala. Uključuje korištenje GIS-a za analize prostora, različite statistike itd. (<i>eng. archaeological computing/ computational archaeology/archaeological informatics</i>)
virtualna arheologija	pojam koji je 1991. godine osmislio P. Reilly. Opisuje korištenje računala u arheologiji, kako bi se virtualno prikazali arheološki lokaliteti ili nalazi, odnosno stvaranje digitalne replike, 3D modela (<i>eng. virtual archaeology</i>)
vizualizacija	općeniti pojam koji opisuje bilo koji pokušaj vizualnog prikaza informacija
vizualizacija podataka	vizualni prikaz podataka, odnosno podatci koji su sažeti u neki shematski oblik. Statistički grafikoni i tematska kartografija su vrste vizualizacije podataka (<i>eng. data visualization</i>)

POPIS KRATICA

3D - trodimenzionalno

ALS (eng.) - *Airborne Laser Scanning*; zračno lasersko skeniranje

B rep (eng.) - *Boundary Representation*

CAA (eng.) - *Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology*

CAD (eng.) - *Computer Aided Design*

CAVE (eng.) - *Cave Automatic Virtual Enviromment*

CSG (eng.) - *Constructive Solid Geometry*; konstruktivna stereometrija

DMR - digitalni model reljefa

DMV - digitalni model visina

ENIAC (eng.) - *Electronic Numerical Integrator and Calculator*

GIS - geografski informacijski sustav

GNSS - globalni navigacijski satelitski sustavi

HRZ - Hrvatski restauratorski zavod

IBM/IbM (eng.) - *Image-based Modelling*; modeliranje temeljeno na fotografijama

IMU (eng.) - *Inertial Measuring Unit*; inercijalni mjerni sustav

IP (eng.) - *Interest Point*

IT - informatička tehnologija (eng. *Information Technology*)

LASER (eng.) - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LIDAR (eng.) - *Light Detection And Ranging*; tehnologija prostornog laserskog skeniranja
koja je potpuno automatizirana; laserski skener, u literaturi najčešće zračni

MM (eng.) - *Mobile Mapping*

MVS (eng.) - *Multi-View Stereo*

NURBS (eng.) - *Non-Uniform Rational B-Splines*

SfM (eng.) - *Structure from Motion*

TLS (eng.) - *Terrestrial Laser Scanning*; terestričko lasersko skeniranje

TOF/ToF (eng.) - *Time-of-Flight*; pulsni laserski skener

UAS (eng.) - *Unmanned aircraft system*; sustav bespilotnog zrakoplova

UAV (eng.) - *Unmanned aerial vehicle*; bespilotni zrakoplov/bespilotna letjelica/dron

1. UVOD

U današnje vrijeme, moderna tehnologija se često mijenja i brzo napreduje. Korištenje 3D modela u arheologiji, mnogi smatraju kao nešto što nam je tehnologija omogućila tek unazad nekoliko godina, no njihova primjena u arheologiji postoji od 80-ih godina 20. st.

Razvoj računala i računalne grafike, promijenio je izgled 3D modela, ali i omogućio njihovu širu primjenu u arheologiji. Tako danas u arheologiji možemo razlikovati dvije vrste 3D modela; 3D digitalizaciju i 3D rekonstrukciju.

3D digitalizacija, koja se provodi uz pomoć laserskih skenera i modeliranja temeljenog na fotografijama, stvara digitalne replike nalaza ili nalazišta, koje pomažu u izradi arheološke dokumentacije.

S druge strane 3D rekonstrukcije najčešće se koriste za prezentaciju arheoloških nalazišta, njegovih dijelova ili nalaza.

Uz navedene primjere, 3D modeli u arheologiji mogu se koristiti na mnogo drugih načina koji imaju svoje prednosti u usporedbi sa starijim arheološkim metodama, no uz njihovu primjenu, vežu se i neki nedostaci.

2. RAZVOJ ARHEOLOGIJE I TEHNOLOGIJE

Šezdesetih godina 20. st., javlja se kritika arheologije, koju mnogi smatraju statičnom i ovisnom o istraživaču, a kao posljedica toga razvija se nova (procesna) arheologija (Šošić Klindžić 2015:93-94). Jedan od ciljeva nove arheologije bila je objektivnost, odnosno sustavno promatranje, mjerenje i bilježenje podataka kroz kvantitativne metode¹ (Lock 2003:2).

Računala, koja u tom vremenu postoje, no bitno se razlikuju od današnjih, uklopila su se u promjenu koja se događa u arheologiji te se, pod utjecajem statističkih metoda nove arheologije, u zapadnoj Europi i sjevernoj Americi, razvila računalna arheologija (*eng. archaeological computing*) (Reilly i Rahtz 2005:1). Peter Ihm i Jean-Claude Gardin su vjerojatno prvi arheolozi koji su za obradu podataka koristili računalo i to već 1959. godine (Wilcock 2005:42).

Razvoj računala omogućio je nove primjene računala u arheologiji, poput stvaranja različitih 3D vizualizacija nalazišta i nalaza, a Paul Reilly je 1991. godine osmislio naziv virtualna arheologija (Reilly 1991:133).

2.1. RAZVOJ RAČUNALA

Računalo je sprava ili uređaj koji služi za računanje i obrađivanje bročano iskazanih podataka.

*Osobno računalo – kompjuter za osobnu uporabu s operacijskim sustavom za jednog korisnika.*²

Smatra se da je jedna od prvih sprava za računanje bio abak (*lat. abacus*), a razvoj znanosti donio je nova otkrića poput logaritama i logaritamskih računala u 17. st., mehaničke kalkulatore te diferencijalni i analitički stroj u 19. st. (Larrivee 1958). U vrijeme Drugog svjetskog rata, 1945. godine, Eckert i Mauchly izradili su jedno od prvih elektroničkih

¹Metode prikupljanja i analize podataka kojima je cilj dati brojčani opis predmeta istraživanja. (<http://struna.ihjj.hr/naziv/kvantitativne-metode/21157/#naziv>, pristup: 19.2.2018.)

²http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=dl1vXRc%3D&keyword=računalo (pristup: 22.2.2018.)

računala, ENIAC (*eng. Electronic Numerical Integrator and Calculator*), za potrebe vojske Sjedinjenih Američkih Država (Ceruzzi 2003:15).

Razdoblje Hladnog rata također je utjecalo na razvoj moderne tehnologije (Ceruzzi 2003:8), a 1960-ih već su postojala komercijalna računala (Ceruzzi 2003:77). Zbog njihove cijene i specijalnih uvjeta koji su zahtijevali, većina takvih računala bila je dostupna na sveučilištima, a arheolozi su ih koristili zbog statističke obrade podataka (Lock 2003:9-10).

Izum mikroprocesora 1971. godine, otvorio je nove mogućnosti u svijetu tehnologije, pa je tako 1975. godine izumljeno mikroračunalo (Lock 2003:9). Apple II, model predstavljen 1977. godine, svojim dizajnom i jednostavnošću u usporedbi s prethodnim mikroračunalima, omogućio je lakše korištenje računala (Ceruzzi 2003:264), a IBM je 1981. godine predstavio IBM PC, preteču osobnih računala kakve i danas poznajemo (Ceruzzi 2003:283). Sredinom 90-ih godina 20. st., osobna računala postala su veliki dio svakodnevnog života (Ceruzzi 2003:360).

Razvojem računala promijenila se i njegova upotreba u arheologiji. U Velikoj Britaniji sredinom 80-ih godina 20. st., računalo je izašlo iz okvira teorijske misli procesne arheologije i koristi se kao pomoć za obradu i procesiranje podataka (Lock 2003:11). Također, početkom 70-ih godina, u Velikoj Britaniji, počela se održavati godišnja konferencija *Computer Applications in Archaeology*, koja i danas ima skraćenicu CAA, iako je preimenovana u *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (Reilly i Rahtz 2005:1).

Krajem 90-ih godina 20. st., moderna je tehnologija postala pristupačnija široj javnosti te se osobna računala, digitalne fotografije i digitalna fotogrametrija, totalne stanice, dizajn potpomognut računalom (*eng. Computer Aided Design*) i lasersko skeniranje sve češće koristi i u arheologiji (Warden 2009:6-7).

Korištenje totalne stanice i digitalne fotografije za dokumentiranje arheološki terena, postao je dokumentacijski standard i u hrvatskoj arheologiji te se dokumentirane situacije naknadno crtaju na računalu uz pomoć CAD programa (Sirovica 2009).

Međutim, korištenje računala i računalnih programa u arheologiji teško je standardizirati jer mogućnost kupovine licence za neke računalne programe ili dovoljno opremljenih računala na kojima se može raditi s tim programima, ovisi o financijskim mogućnostima (Wilcock 2005:43). Također, velika prepreka u prošlosti bila je i nekompatibilnost računalnih programa

ili operacijskih sustava, npr. Windows i macOS (Wilcock 2005:43), no današnja tehnologija uglavnom je riješila i taj problem.

2.2. VIZUALIZACIJA I RAČUNALNA GRAFIKA

Vizualizacija, odnosno vizualizacija informacija, je općeniti pojam koji opisuje bilo koji pokušaj vizualnog prikaza informacija, pa je tako i paleolitička umjetnost oblik vizualizacije. Vizualizacija podataka je uži pojam i opisuje vizualni prikaz većeg broja podataka koji su, uz pomoć matematičkih pristupa, sažeti u neki shematski oblik. Svoje početke ima u 16. st., kada se razvijaju mnoge tehnike i instrumenti za precizna mjerenja, a razvoj statistike u 18. i 19. st., oslanjao se na vizualizaciju podataka, npr. korištenjem dijagrama kako bi se objasnili neki matematički dokazi i funkcije. Razvoj preciznog mjerenja utjecao je i na geografiju, pa se razvija i tematska kartografija, također oblik vizualnog prikaza podataka (Friendly 2009:1-2).

Razvoj računala i računalne grafike promijenio je pristup vizualizaciji podataka. Današnja računala mogu obraditi veliki broj podataka u kratkom vremenu, a računalna grafika omogućuje prikaz tih podataka na način koji je prije 50 godina bio nezamisliv. Razvoj računalne grafike prati razvoj računala, a ocem računalne grafike smatra se Ivan Sutherland, koji je 1963. godine stvorio SKETCHPAD, računalni program koji je omogućavao crtanje dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih oblika korištenjem svjetlosne olovke na zaslonu (Chopine 2011:1-2).

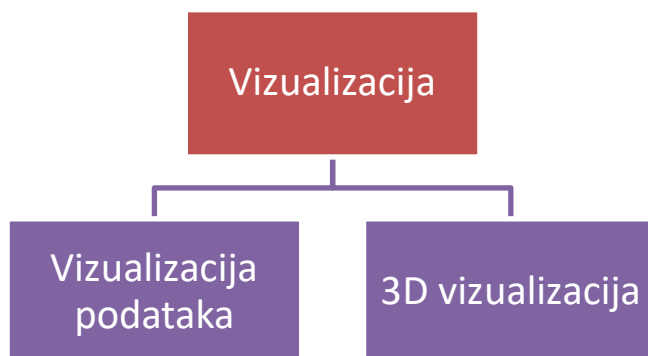
Računalna grafika (*eng. Computer Graphic*) je širok pojam i obuhvaća velik broj metoda koje se koriste za stvaranje grafičkih prikaza³ na računalu (Brinkmann 1999:1). Ugrubo, računalnu grafiku možemo definirati kao dio informacijske tehnologije koja se bavi dobivanjem i obradom grafičkih prikaza uz pomoć računala⁴. Možemo ju podijeliti na dvije glavne kategorije, 3D računalnu grafiku i 2D računalnu grafiku (Brinkmann 1999:1). 3D modeliranje ili digitalno modeliranje, je proces stvaranja matematičkih prikaza trodimenzionalnih objekata, odnosno 3D modela (Vaughan 2012:4).

Razvojem tehnologije, mogućnosti vizualizacije podataka postaju sve veće i iako arheologija danas koristi razne računalne programe za različite vizualizacije, pojmovi vizualizacija,

³ U engleskom jeziku koristi se pojam *image*.

⁴ <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=68673> (pristup: 27.2.2018.)

vizualizacija podataka i 3D vizualizacija uglavnom se koriste kao sinonimi. Vizualizacija je općeniti pojam, a vizualizacija podataka i 3D vizualizacija su uži pojmovi (sl. 1).



Slika 1: Vizualizacija odnosa između pomova „vizualizacija“, „vizualizacija podataka“ i „3D vizualizacija“ (izradila V. Gligora)

Vizualizacija podataka, kao pojam, nije ovisna o računalu, odnosno ako netko rukom nacrtava grafikon kako bi prikazao analizirane podatke, to je vizualizacija podataka isto kao što bi to bio i grafikon napravljen na računalu. Računalo je vizualizaciju podataka učinio jednostavnijom i bržom i mnoge vizualizacije podataka danas ne bi bile moguće bez korištenja računala, pogotovo one vizualizacije podataka koje koriste arheolozi. Možemo reći da je vizualizacija podataka u arheologiji jednako ovisna o računalu kao i 3D vizualizacija. Međutim, postoji još jedna razlika između ova dva pojma, a ona je za arheologiju kao znanost, važnija od toga je li nešto ovisno o računalu ili nije. Vizualizacija podataka arheologu omogućuje novi pogled na prikupljene podatke. Velika količina keramičkih ulomaka arheologu ne znači mnogo, no obrada keramičkog materijala, statistika koju može napraviti i na kraju vizualni prikaz tih podataka, može poslužiti kao temelj arheološkoj interpretaciji. Korištenje georadara na arheološkom nalazištu, vizualno prikazuje podatke koji postoje, a nisu vidljivi i na temelju takve vizualizacije, arheolog može dati interpretaciju nekog arheološkog nalazišta. Cilj vizualizacije podataka je donijeti novi pogled na podatke sakupljene arheološkim istraživanjima i takva vizualizacija daje znanstvene temelje arheološkoj interpretaciji.

S druge strane, 3D vizualizacija označava stvaranje grafičkog prikaza, 3D modela, uz pomoć računalnog programa. Ona je ovisna o računalu. Danas u arheologiji možemo razlikovati dva pojma vezana uz 3D vizualizaciju, 3D digitalizaciju i 3D rekonstrukciju (Štuhec 2017:17). 3D

digitalizacija je postupak kojim se prostorni oblik nekog predmeta, objekta ili terena određuje (snima) i zapisuje u digitalnom obliku⁵.

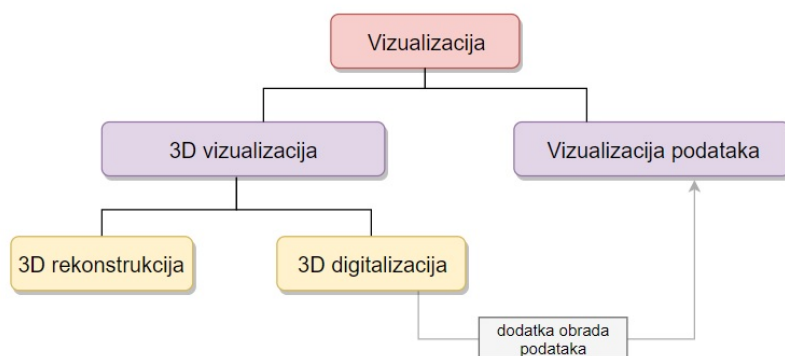
Pojam 3D rekonstrukcija, koji se koristi u fotogrametriji i području računalnog vida (*eng. computer vision*), označava digitalno rekonstruiranje predmeta ili objekta koji postoji u stvarnom svijetu⁶. Pojam rekonstrukcije postoji u arheologiji i odnosi se na (virtualno) stvaranje objekta ili dijela objekta u svrhu prikazivanja kako je određeni objekt izgledao originalno. Stoga, 3D rekonstrukcija je pojam koji u arheologiji opisuje rekonstrukciju objekta ili dijelova objekta koji više ne postoje, uz pomoć 3D modeliranja (Štuhec 2017:17).

3D digitalizacija, bilo da se koriste 3D skeneri ili računalni programi koji se temelje na fotogrametriji, stvara repliku stvarnog objekta u digitalnom obliku. 3D model tada prikazuje objekt onakvim kakav on stvarno je. Takav 3D model omogućuje arheologu npr. jednostavnije dokumentiranje, no on sam po sebi ne donosi nikakve nove informacije koje mogu služiti kao temelj za interpretaciju. Svrha 3D digitalizacije npr. nekog zida je da on u digitalnom obliku bude isti kao i stvarni zid, što je drugačije, gotovo suprotno, od cilja kojeg ima vizualizacija podataka. Međutim, podatke koje smo dobili 3D digitalizacijom možemo dodatno obrađivati, npr. uz pomoć GIS programa i napraviti digitalni model visina. Tada imamo novi pogled na podatke i to je vizualizacija podataka koja može služiti za daljnje interpretacije (sl. 2). Dakle, 3D model koji prikazuje arheološko nalazište ili nalaz točno onakvim kakav je, kakvim ga možemo vidjeti i kada smo na nalazištu ili kada držimo nalaz u rukama, arheologiji može olakšati dokumentaciju, ali ne služi za donošenje novih zaključaka i interpretacija.

3D rekonstrukcija, također ne otvara mogućnost novim interpretacijama. 3D rekonstrukcija je rezultat interpretacije podataka. Na temelju sakupljenih, proučenih i analiziranih podataka, arheolog može donijeti zaključak kako je nešto izgledalo kada je napravljeno i te će zaključke koristiti kako bi napravio 3D rekonstrukciju objekta ili nalaza.

⁵ <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=68025> (pristup: 28.2.2018.)

⁶ U arheologiji je to 3D digitalizacija.



Slika 2: Odnos pojmova vizualizacije u arheologiji (izradila V. Gligora)

2.3. FOTOGRAFIJA I FOTOGRAMETRIJA

Fotografija se u arheologiji koristi duže od svih ostalih oblika dokumentacije koje danas koristimo. Povjerenici British Museuma su se 1852. godine savjetovali s F. Talbotom, fotografskim pioninom, C. Brookeom, nadzornikom Odjela za fotografiju Royal Observatorija i C. Wheatstoneom, fizičarom, o mogućnosti fotografiranja pločica s klinastim pismom (Dorrell 1994:2). M. du Camp zaslužan je neke od prvih fotografija arheoloških nalazišta u Egiptu, Palestini i Siriji, koje je fotografirao na svojim putovanjima od 1849. do 1851. godine (Dorrell 1994:3). Serija fotografija M. Tranchanda, snimljene tijekom iskopavanja na području nekadašnje Asirije, vjerojatno su najznačajnije. Istraživanje je trajalo od 1852. do 1855. godine, a uz strukture koje su fotografirane postavljena je mjerka (Dorrell 1994:4-5). Krajem 19. i početkom 20. st., fotografija je postala standardna tehnika koja se koristila na iskopavanjima i za dokumentaciju nalaza. Potencijal zračne fotografije, čija se primjena unutar arheologije može pratiti od 1880-ih, shvaćen je za vrijeme Prvog svjetskog rata te je od 1920-ih primjena zračnih fotografija u arheologiji češća (Dorrell 1994:6-7).

Fotogrametrija je znanost i tehnika određivanja oblika, veličine ili položaja nekog objekta snimanjem, mjerenjem i interpretacijom fotografskih snimaka⁷. Analogna fotogrametrija se za proces određivanja koristi analognim fotografijama i optičko-mehaničkim uređajima, dok se kod analitičke fotogrametrije koriste analogne fotografije i računalo (Kraus 2004:1). Digitalna fotogrametrija počela se razvijati 1990-ih godina (Štuhec 2017:18), a za proces

⁷ <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=20257> (pristup: 1.3.2018.)

rekonstruiranja geometrijskih odnosa, u digitalnoj fotogrametriji, koriste se digitalna fotografija i matematički modeli analitičke fotogrametrije (Štuhec i Zachar 2017:34).

Prema položaju snimališta, fotogrametriju možemo podijeliti na npr. aerofotogrametriju i terestričku fotogrametriju (*eng. close-range photogrammetry*), dok prema metodi prikupljanja i obrade podataka, fotogrametriju možemo podijeliti na fotogrametriju jedne fotografije (*eng. single-image photogrammetry*), stereofotogrametriju (*eng. stereophotogrammetry*), konvergentnu fotogrametriju (*eng. convergent photogrammetry*) i modeliranje na temelju fotografija (*eng. image-based modelling*⁸) (Štuhec i Zachar 2017:34-35).

Principi fotogrametrije, koje koriste računalni programi poput *Agisoft PhotoScana*, danas nam omogućuju 3D digitalizaciju nalazišta i nalaza preko digitalnih fotografija. Međutim, primjena fotogrametrije u arheologiji počinje 1920-ih, kada se uz pomoć zračnih fotografija mapiraju velika područja. Principi fotogrametrije, najčešće niske zračne fotografije, snimljene uz pomoć ljestava i štapova, za dokumentiranje arheoloških iskopavanja, koriste se od 1960-ih (Štuhec 2017:17).

Digitalna fotografija i fotogrametrija te računalna grafika od 1990-ih polako se počinju koristiti zajedno unutar nekih istraživačkih područja, npr. računalni vid, a krajem 2000-ih javljaju se ekonomski prihvatljivi računalni programi koji arheolozima omogućuju jednostavnu i učinkovitu 3D digitalizaciju nalazišta i nalaza modeliranjem temeljenom na fotografijama (Štuhec 2017:17).

2.4. VIRTUALNA ARHEOLOGIJA

Pojam virtualne arheologije osmislio je 1991. godine Paul Reilly, a naglasak stavlja na *virtualno*, odnosno na model, repliku koja može služiti kao zamjena za original (Reilly 1991:133).

Prvi članak o korištenju 3D-a u arheologiji, objavio je Leo Biek, 1974. godine i bio je to prvi u nizu članaka o interaktivnom i vizualnom sustavu LERNIE (Štuhec 2017:18).

Od sredine 1980-ih u arheologiji se koristi *solid modelling*⁹, najviše na antičkim nalazištima te su prvi projekti temeljeni na suradnji arheologa i računalnih znanstvenika (Reilly 2005:93).

⁸ *eng. IBM*

⁹ 3D modeliranje za koje se koriste CAD računalni programi.

Vjerojatno prva animirana 3D rekonstrukcija nalazišta napravljena je 1985. godine, a animacija prikazuje faze gradnje katedrale Old Minister u Winchesteru¹⁰. Napravljena je u UK Scientific Centeru, uz pomoć IBM-ovog Winchester Solid Modeller (WINSOM) sistema (Reilly 2005:95). Ova rana faza 3D modeliranja u arheologiji uglavnom je bila fokusirana na 3D rekonstrukcije, koje su kao cilj imale zainteresirati javnost i pomoći im u boljem razumijevanju arheoloških nalazišta (Reilly 2005:97).

Jedna od prvih primjena 3D digitalizacije uz pomoć totalne stanice, bila je na srednjovjekovnoj moti Mathrafal u Walesu, no tek 1990-ih su 3D tehnike dobile više pažnje unutar arheologije (Štuhec 2017:18).

Uz pomoć WINSOM-a, P. Reilly je napravio prvu 3D simulaciju arheološkog nalazišta „Grafland“¹¹ te ju predstavio na CAA konferenciji 1990. godine (Reilly 1991:136).

Kako se sve više počinje javljati zanimanje za virtualnu arheologiju, pokreću se projekti koji za cilj imaju stvaranje alata za snimanje, rekonstrukciju i vizualizaciju arheoloških ostataka, a jedan od prvi većih projekata bio je 3D MURALE. 2000-ih pokrenuto je nekoliko sličnih projekata. EPOCH i 3D-COFORM bili su najuspješniji, pa je tako 2005. godine, unutar EPOCH projekta stvoren računalni program za obradu i analizu 3D podataka, MeshLab. ARC3D, online servis za 3D modeliranje na temelju fotografija, pokrenut je 2006. godine i označio je početak sve češćeg korištenja ovakvog modeliranja za 3D digitalizaciju arheoloških nalazišta, a uskoro su se pojavili programi kao što je *Autodesk 123D Catch*, *Visual sfM*, *Agisoft PhotoScan* itd (Štuhec 2017:19).

¹⁰ Animacija je dostupna na web-adresi: <https://vimeo.com/170699480>.

¹¹ Video je dostupan na web-adresi: <https://vimeo.com/66955158>.

3. 3D MODELI U ARHEOLOGIJI

3.1. 3D DIGITALIZACIJA

Tehnike koje nam omogućuju 3D digitalizaciju mogu se podijeliti u dvije skupine, aktivne i pasivne tehnike (Štuhec 2017:17). Pasivni senzori poput digitalnih fotoaparata, omogućuju nam sakupljanje 2D podataka uz pomoć fotografija, koji se uz pomoć matematičkih formula mogu preračunati u 3D podatke. Aktivni senzori, odnosno laserski skener i radar, prikupljaju podatke u 3D obliku (Remondino 2011:1106).

3.1.1. 3D SKENERI

*Laser je uređaj za stvaranje ili pojačavanje koherentnih valova svjetlosti, koji snopu svjetlosti daje učinkovitu snagu*¹².

Prvi 3D skeneri pojavili su se 1960-ih, no tek se 1980-ih strukturirano svjetlo¹³ (*eng. structured light*) i laseri počinju koristiti za mjerenje površine. Inženjeri počinju intenzivnije koristiti 3D skenere 1990-ih, a tada postaju popularni i u arheologiji (Štular i Štuhec 2015:7).

Danas postoji mnogo različitih instrumenata koje nazivamo laserskim skenerima, a razlikuju se po načinu upravljanja i korištenja te drugačijim stupnjem preciznosti i točnosti (Historic England 2018:4). Postoje terestrički, zračni i ručni skeneri (Jončić i Zachar 2017:24-26).

Podatci koje prikupe laserski skeneri nazivaju se oblak točaka (*eng. point cloud*), a to je skup velikog broja točaka, koje su iz daljinskih i kutnih mjera pretvorene u Kartezijev (x, y, z) koordinatni sustav (Historic England 2018:4).

Pojam LIDAR (*eng. Light Detection And Ranging*) označava potpuno automatiziran, aktivan, optičko-mehanički postupak prikupljanja prostornih podataka dostupnih s aktualnih snimališta (Gajski 2007:16) i obično se u literaturi odnosi na zračne skenere, iako označava i terestričke skenere (Historic England 2018:4). Pojmovi *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) i *Airborne Laser Scanning* (ALS), odnosno u hrvatskom jeziku terestričko i zračno lasersko skeniranje, s druge strane, jasno definiraju tehnologiju prostornog laserskog skeniranja.

Terestrički skeneri obično su postavljeni na tronožac, no postoje skeneri koji se montiraju na vozila poput automobila i brodova (Beraldin et al. 2010:36), a nedavno su se počeli

¹² http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=e1ZuWhg%3D&keyword=laser (pristup: 5.3.2018.)

¹³ Proces projiciranja uzorka (npr. mreže) na neko područje. Deformacija uzorka u doticaju s površinom pomože skeneru izračunati dubinu i daje mu informacije o objektima na površini.

proizvoditi i *backpack* skeneri (sl. 3), koji omogućuju prikupljanje podataka hodanjem po terenu (Historic England 2018:4). Ovakvi, mobilni skeneri, nazivaju se *Mobile Mapping* (MM) sustavima.

Oblak točaka dobiven terestričkim skenerima, osim 3D koordinata i intenziteta signala, može sadržavati i RGB (*eng. Red Green Blue*) komponentu za svaku točku. (Golek et al. 2012:55). Integracijom terestričkog skenera i digitalne kamere moguće je, osim geometrije objekta, dobiti i njegovu teksturu. Digitalna kamera snima fotografiju visoke rezolucije, a njeno spajanje s oblakom točaka, omogućuje stvaranje teksture objekta (Golek et al. 2012:55).



Slika 3: *Leica Pegasus – Backpack Wearable Mobile Mapping Solution* (preuzeto sa: <http://bit.ly/2H2J5H0>, pristup 4.3.2018.)

Zračni skeneri omogućuju mapiranje topografskih visina i visina objekta na površini. Prikupljeni podaci mogu se koristiti kao baza za izradu digitalnih modela reljefa (DMR) i digitalnih modela visina (DMV) (Jončić i Zachar 2017:24). Zračni skeneri imaju isti princip određivanja koordinata mjerenih točaka kao i terestrički skeneri, no tehnologije se razlikuju (Gajski 2007:16). Uz sam skener, zračni sistemi skeniranja opremljeni su GNSS-om i inercijalnim mjernim sustavom (*eng. Inertial Measuring Unit – IMU*), koji konstantno određuju lokaciju i orijentaciju senzora. Informacije o lokaciji i orijentaciji dodaju se podacima koje skener prikuplja o objektu kojeg snima (Historic England 2018:15). Također, zračni skeneri često su opremljeni digitalnim kamerama, koje prikupljaju fotografske podatke. Fotografije mogu olakšati interpretaciju podataka ako je teško prepoznati neke objekte samo iz prostornih podataka (Beraldin et al. 2010:23).

Zračni skeneri odašilju laserski impuls te se zraka rasprši po vegetaciji, objektima te na kraju i na samu površinu (Gajski 2007:19). Zraka se odbija od svake površine te skeneri imaju mogućnost detektirati više povrataka odaslanog impulsa (Historic England 2018:15). Zbog velikog broja sakupljenih podataka, podatci prikupljeni zračnim skenerima se filtriraju te se korisne informacije dijele u razrede, odnosno klasificiraju se. Danas se najčešće koriste tri klase: vegetacija, građevine i teren (Gajski 2007:21).

Nedavno su se na tržištu pojavili i ekonomski isplativi zračni skeneri, koji se mogu montirati na bespilotne zrakoplove (Historic England 2018:16; Vuković 2015:23). Bespilotni zrakoplovi u arheologiji se najviše koriste za zračno fotografiranje te prikupljanje podataka, odnosno fotografija, za izradu 3D modela na temelju fotografija.

Ručni skeneri uglavnom rade po principu optičke triangulacije (Historic England 2018:7) te se u arheologiji najviše koriste za digitalizaciju pokretnih arheoloških nalaza (Jončić i Zachar 2017:25).

Većina laserskih skenera može se podijeliti u 3 kategorije prema načinu mjerenja udaljenosti: pulsni (*eng. Time-of-Flight –ToF*), fazni (*eng. phase-shift*) i triangulacijski (*eng. Triangulation*) (Historic England 2018: 7-14; Beraldin et al. 2010:3-11; Miler et al. 2007:36).

Triangulacijski skener radi na principu optičke triangulacije, odnosno laserska zraka se projicira na objekt (Miler et al. 2007:36). Senzor, koji je smješten na poznatoj udaljenosti od izvora zrake, registrira zrake koje se odbijaju od objekta i na temelju poznatih vrijednosti, uređaj izračunava udaljenost između objekta i skenera. Uz poznatu udaljenost senzora i izvora zrake, poznat je i kut između njih, a proces određivanja tih vrijednosti naziva se *kalibracija uređaja* (Jončić i Zachar 2017:27). Neki tipovi triangulacijskih skenera rade po principu strukturiranog svjetla i nisu, strogo gledano, laserski skeneri (Historic England 2018:7).

Pulsni (ToF) skeneri odašilju kratki impuls koji se dijeli na dva dijela. Prvi dio odašilje se u prijamnik i pokreće mjerenje vremena, a drugi dio putuje do objekta (Golek et al. 2012:55), reflektira se te se vraća nazad. Skener mjeri vrijeme koje prođe od odašiljanja laserskog impulsa do vraćanja (*time-of-flight*), te uz pomoć formule koja uključuje brzinu svjetlosti, računa udaljenost skenera od objekta (Historic England 2018:10; Golek et al. 2012:55; Beraldin et al. 2010:3; Gajski 2007:18). Za zračna laserska skeniranja koriste se ovakvi tipovi skenera (Remondino 2011:1109).

Fazni skeneri također računaju vrijeme koje prođe od odašiljanja signala do njegova povratka (*time-of-flight*), no to rade po drugačijem principu od pulsni skenera. Skener emitira kontinuiranu lasersku zraku, koja je modulirana¹⁴ harmonijskim valom te uspoređuje odašlani i primljeni val. Fazna razlika između oblika ta dva vala iskazuje kašnjenje (*eng. time delay*) i

¹⁴ Modulacija je postupak mijenjanja ili upravljanja svojstvima nosećeg vala koji titra određenom amplitudom i frekvencijom tako da promjene predstavljaju smisleni informaciju (http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=e1lhURY%3D&keyword=modulacija; pristup:5.3.2018.).

omogućuje skeneru da izračuna udaljenost od objekta (Golek et al. 2012:56; Beraldin et al. 2010:6-7).

Laserske skenere možemo podijeliti i po njihovom dometu i preciznosti, a važno je znati i koji je cilj skeniranja, kako bi se odabrala pravilna vrsta skenera za postizanje tog cilja (sl. 4).

Scanning System		Usage	Typical Accuracies (mm)	Typical Range (m)
Triangulation	Rotation stage	Small objects taken to scanner. Replica production	0.05	0.1 – 1
	Arm mounted	Small objects. Lab or field. Replica production	0.05	0.1 – 3
	Tripod mounted	Small objects in the field. Replica production	0.1 – 1	0.1 – 2.5
	Close range handheld	Small objects. Lab. Replica production	0.03 – 1	0.2 – 0.3
	Mobile (handheld, backpack)	Awkward locations eg building interiors, caves	0.03 – 30	0.3 – 20
Pulse (TOF)	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawings, analysis, 3D models	1 – 6	0.5 – 1000
	Mobile (vehicle)	Streetscapes, highways, railways. Drawings, analysis, 3D models	10 – 50	10 – 200
	UAS	Building roofscapes, archaeological sites. Mapping and 3D models	20 – 200	10 – 125
	Aerial	Large site prospecting and mapping	50 – 300	100 – 3500
Phase	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawing, analysis, 3D models	2 – 10	1 – 300

Slika 4: Podjela laserskih skenera i njihova primjena (preuzeto iz: Historic England 2018:8, *Table 1*)

Lasersko skeniranje uglavnom se provodi od strane geodeta, dok arheolozi obično dobiju gotov proizvod, iako bi za najbolje rezultate bila poželjna suradnja između arheologa i geodeta na terenu (Jončić i Zachar 2017:27). Zbog visoke cijene laserskih skenera, većina ih nije ekonomski isplativa za arheologe (Štuhec 2017:18), a i ovisnost arheologa o geodetima, koji obrađuju podatke, je nedostatak primjene laserskog skeniranja u arheologiji.

3D skeneri koji rade na principu strukturiranog svjetla, ne spadaju u laserske skenere i obično su to ručni skeneri, a udaljenost od predmeta računaju po principu triangulacije. Zbog njihove pristupačne cijene, poraslo je i njihovo korištenje u arheologiji, najčešće za dokumentiranje muzejskih zbirki, no njihova preciznost nije visoka kao i preciznost laserskih skenera (Jončić i Zachar 2017:18).

3.1.2. 3D MODELI TEMELJENI NA FOTOGRAFIJAMA

Cilj modeliranja na temelju fotografija je dobiti 3D podatke stvarnog objekta ili predmeta uz pomoć 2D fotografija te predstavlja sjecište ciljeva računalne grafike i računalnog vida (Quan 2010:1).

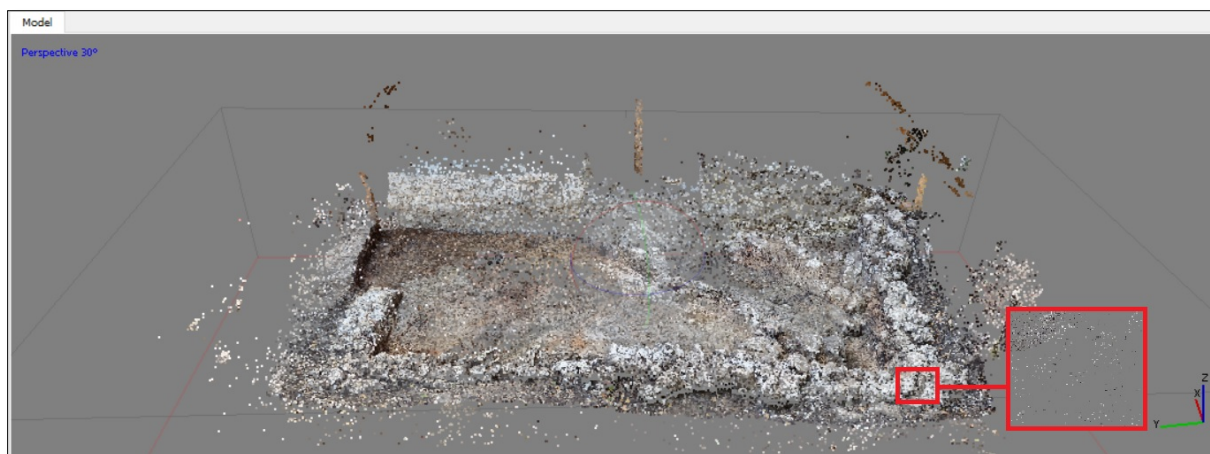
Većina operativnih principa modeliranja na temelju fotografija proizlazi iz stereofotogrametrije te se ti principi koriste u novijim, automatiziranim računalnim programima koji koriste kombinaciju *structure from motion* (SfM) i *multi-view stereo* (MVS) radnih procesa (Historic England 2017:4). Takvi programi ne zahtijevaju opsežno znanje o fotogrametriji i računalnom vidu i sve češće se uključuju u proces dokumentiranja kulturne baštine (Hornák 2017a:14).

Prvi korak u procesu izrade 3D modela na temelju fotografija je fotografiranje objekta ili predmeta s više fotografija koje se preklapaju (Historic England 2017:4) te se fotografije unose u računalni program. Iz tih fotografija, SfM procesom, program generira *sparse point cloud*¹⁵, koji se sastoji od *tie points*, prepoznatih i povezanih preko fotografija (Historic England 2017:8). Izrada raspršenog oblaka točaka sastoji se od nekoliko koraka, a prvi je prepoznavanje *interest points* (IP) ili *key points* na fotografijama (Historic England 2017:8; Štuhec i Zachar 2017:39). Takve točke trebale bi se pojavljivati na više fotografija, bez obzira na drugačije svjetlosne uvjete ili šuma na fotografijama, a program ih pronalazi uz pomoć algoritama kao što je npr. SIFT (*eng. scale-invariant feature transform*) algoritam¹⁶ (Historic England 2017:8; Štuhec i Zachar 2017:39). Korisnik može sam odrediti broj IP-a, dok je zadana količina IP-a u npr. *Agisoft Photoscanu*, 40 000 točaka po fotografiji (Historic England 2017:8). Nakon toga, program povezuje IP na različitim fotografijama, izbacujući točke koje se ne podudaraju (Historic England 2017:8). Povezane točke nazivaju se *tie points* i algoritam ih koristi za računanje pozicije i orijentacije fotoaparata kod fotografiranja te njegovih internih parametara poput žarišne duljine, zakrivljenosti leće i sl. Rezultat ovog koraka je raspršen oblak točaka (sl. 5), koji često može sadržavati točke koje su nepotrebne za daljnju izradu modela te je potrebno „počistiti“ oblak točaka, pošto nepotrebne točke mogu kasnije utjecati na kvalitetu izrade *mesha* (Štuhec i Zachar 2017:39). S druge strane, potrebno je paziti i da se ne „počisti“ prevelik broj točaka jer bi njihov nedostatak, također, mogao

¹⁵ Predlažem hrvatski izraz, raspršeni oblak točaka, koji ću koristiti dalje u tekstu.

¹⁶ Algoritam je objavio David Lowe (Lowe 1999).

utjecati na daljnje korake u izradi 3D modela (Historic England 2017:14; Štuhec i Zachar 2017:39).



Slika 5: Raspršen oblak točaka; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, (HRZ, izrada V. Gligora, 2017)

Idući korak je stvaranje *dense point clouda*¹⁷ uz pomoć MVS-a. Za izradu zbijenog oblaka točaka, program ponovo koristi IP, no ovog puta koristi i točke koje imaju manje ponavljanja od onih korištenih za raspršen oblak točaka (Historic England 2017:9). Zbijen oblak točaka (sl. 6) koristi se kod izrade *mesha* (sl. 7) te se na takav 3D model može dodati tekstura (sl. 8) (Štuhec i Zachar 2017:40).



Slika 6: Zbijen oblak točaka; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, (HRZ, izrada V. Gligora, 2017)

¹⁷ Predlažem hrvatski izraz, zbijen oblak točaka, koji ću koristiti dalje u tekstu.



Slika 7: Mesh; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izrada V. Gligora, 2017)



Slika 8: Tekstura; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izrada V. Gligora, 2017)

Najvažniji korak u izradi 3D modela na temelju fotografija, zasigurno je samo fotografiranje objekta ili predmeta te je potrebno pravilno fotografirati kako bi se dobili najbolji rezultati (Štuhec i Zachar 2017:40). Velika količina nekvalitetnih fotografija ne garantira uspješnu izradu 3D modela, a velik broj fotografija utječe i na brzinu obrade podataka u računalnom programu, odnosno, manji broj kvalitetnih fotografija dat će puno bolje rezultate.

3D modeli mogu se georeferencirati¹⁸ uz pomoć foto-točaka, što nam je važno za izradu nacrtna dokumentacije.

¹⁸ Geokodiranje pojedinih točaka objekta s pomoći geografskih koordinata ili pravokutnih koordinata (<http://struna.ihjj.hr/naziv/georeferenciranje/1743/>; pristup: 16.5.2018.).

3.1.3 ARHEOLOŠKA DOKUMENTACIJA I 3D MODELI

Razvoj računalnih programa utjecao je na pristup izrade arheološke dokumentacije te se uz pomoć totalnih stanica i digitalnih fotoaparata može sakupiti velik broj podataka o terenskom istraživanju. Podatci se obrađuju uz pomoć računala, a CAD programi omogućuju digitalno crtanje terenskih situacija. Iako se danas i dalje koriste crteži crtani rukom na terenu, crtanje na računalu ubrzava proces terenskog dokumentiranja te nudi veću preciznost. Kod crtanja na milimetarskom papiru rukom, može doći do iskrivljavanja metra ili pomaka kolaca na koji je metar pričvršćen te se preciznost ne može mjeriti s preciznošću točaka snimljenih totalnom stanicom (Sirovica 2009:45), pod uvjetom da je totalna stanica pravilno postavljena i pravilno se koristi. Nadalje, za potrebe objavljivanja, terenski se crteži također moraju digitalizirati, odnosno ponovo nacrtati na računalu, no oni tada nisu georeferencirani i određeni su mjerilom koje se koristilo na terenu kod izrade crteža. S druge strane, kod digitalnih crteža, mjerilo možemo mijenjati i prilagođavati potrebama ispisa (Sirovica 2009:46).

Dokumentiranje uz pomoć digitalnih fotografija, odnosno izrada foto-skica, već se duže vrijeme koristi na arheološkim istraživanjima. Uz određene terenske situacije, poput struktura ili grobova, postavljaju se foto-točke te se situacije fotografiraju vertikalnim fotografijama, a totalnom stanicom mjere se koordinate foto-točaka (sl. 9). Nakon toga, fotografija i izmjerene koordinate unose se u CAD program, a fotografiju georeferenciramo preko foto-točaka i snimljenih podataka. Preko takve, georeferencirane fotografije, na računalu iscrtavamo fotografiranu situaciju (Sirovica 2009:35).

Slika 9: Vertikalna fotografija kostura s foto-točkama (preuzeto iz: Sirovica 2009:36, autor D. Tresić Pavičić).



U slučaju da je situacija prevelika da bi se fotografirala jednom fotografijom, fotografira se nizom fotografija, koje se moraju preklapati preko barem dvije foto-točke te se kasnije svaka fotografija posebno georeferencira. Zadnje dvije točke na jednoj fotografiji preklapaju se s

dvije prve točke na sljedećoj fotografiji, kako si se smanjila distorzija fotografije, a dobiveni fotomozaik služi nam za iscrtavanje tlocrtne situacije u CAD programima (Miloglav 2017:65). Od nedavno, za ovakve situacije, počinju se koristiti 3D modeli, a fotografiranjem za 3D model može koristiti i manji broj foto-točaka za kasnije georeferenciranje te nije potrebno georeferencirati svaku fotografiju posebno. Neki programi, npr. *Agisoft Photoscan*, omogućuje georeferenciranje 3D modela prije, tijekom ili nakon njegove izrade. Nakon što je program izradio 3D model, moguće je stvaranje ortomozaika¹⁹ (eng. *orthomosaic*), odnosno georeferenciranih fotografija, koje unosimo u CAD program. Nadalje, prednost 3D modela, kod dokumentiranja određenih situacija, je da možemo dobiti podatke i o presjecima, npr. presjeke grobne rake (sl. 10 i 11).



Slika 10: 3D model groba; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)

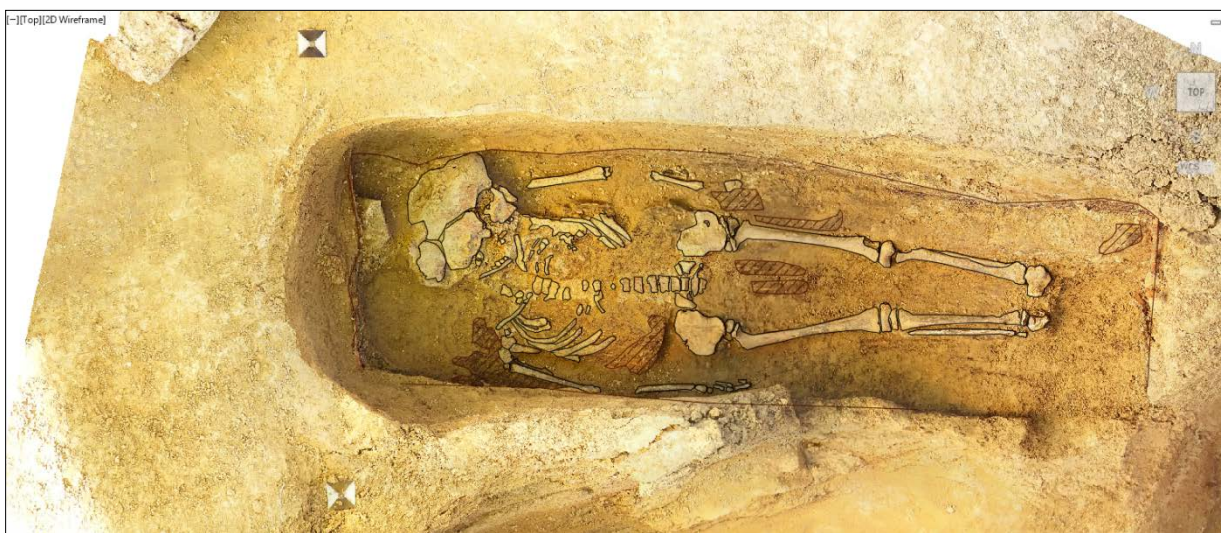


Slika 11: Ortomozaik uzdužnog presjeka groba; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V.Gligora, 2017)

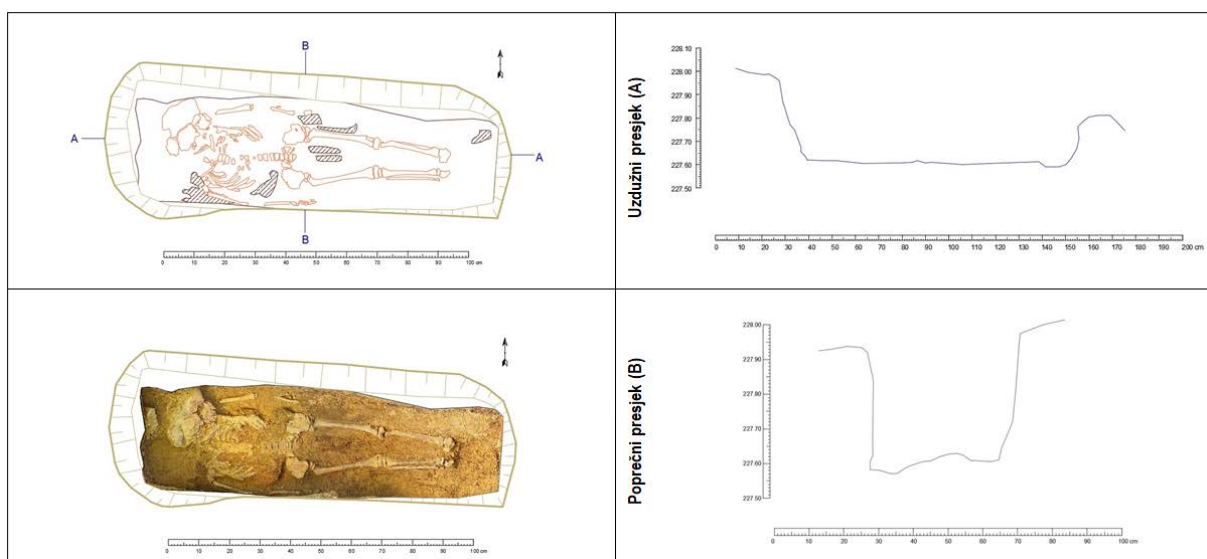
¹⁹ Georeferencirana fotografija dobivena računalnom obradom više fotografija i koordinatnih podataka

Ovakav pristup dokumentiranju, ubrzava proces dokumentiranja na terenu, no potrebno je napomenuti da neke terenske situacije ne zahtijevaju izradu 3D modela, odnosno izrada foto-skice i dalje može biti praktičniji pristup.

Nakon izrade 3D modela, georeferencirane fotografije unose se u CAD program te se preko njih iscrtava dokumentirana situacija (sl. 12 i 13). Računalno crtanje nudi i mogućnost dodatnog mjerenja koja nisu obavljena za vrijeme terenskih istraživanja te dodatnu obradu prikupljenih podataka (Sirovica 2009:46-47).

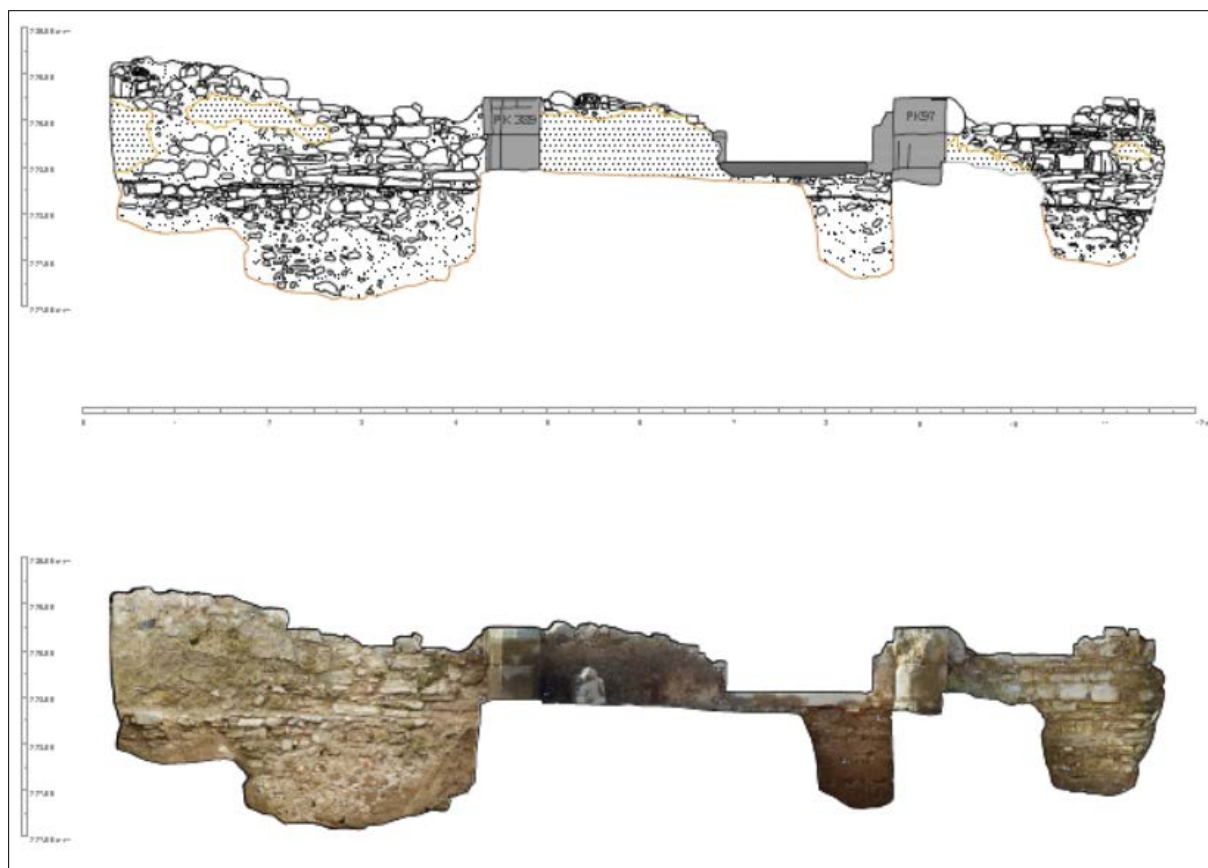


Slika 12: Crtanje groba preko ortomozaika; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)



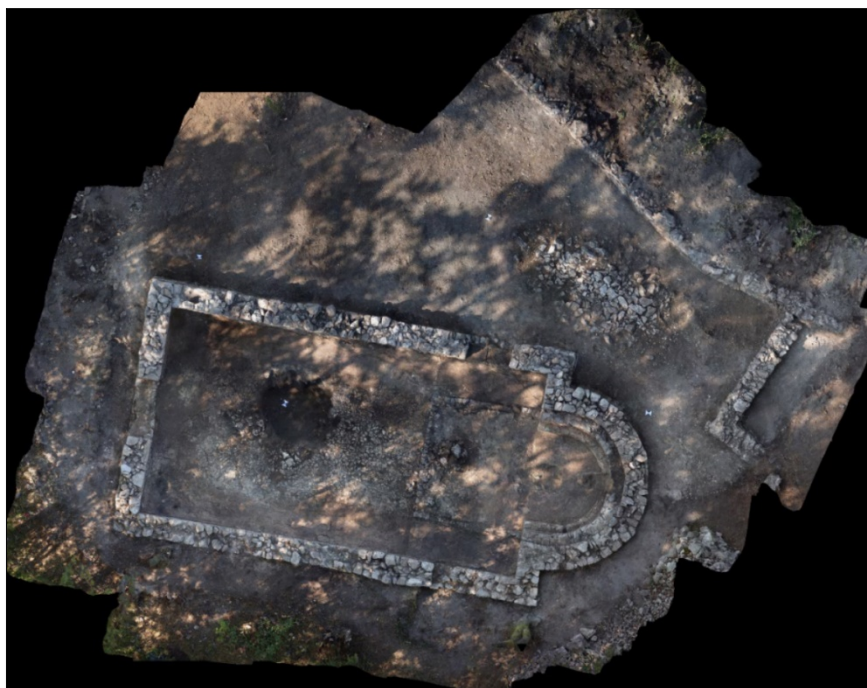
Slika 13: Dokumentacija groba izrađena uz pomoć *Agisoft Photoscan* i *AutoCAD* računalnih programa; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)

Osim za dokumentiranje grobova, modeliranje na temelju fotografija korisno je za dokumentiranje arhitektonskih ostataka. 3D model, odnosno ortomozaik, omogućuje nam računalno crtanje s puno više detalja no što bi to bilo moguće postići crtanjem na terenu (sl. 14). Brzina izrade crteža, kao i kod terenskih crteža, ovisi o sposobnosti samog crtača, no samo fotografiranje zida i snimanje koordinata totalnom stanicom, zahtjeva manje vremena nego terensko crtanje te dobivamo veći broj podataka od onih na terenskom crtežu, nacrtanom u određenom mjerilu.



Slika 14: Primjer nacrtne dokumentacije pogleda na lice zida; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)

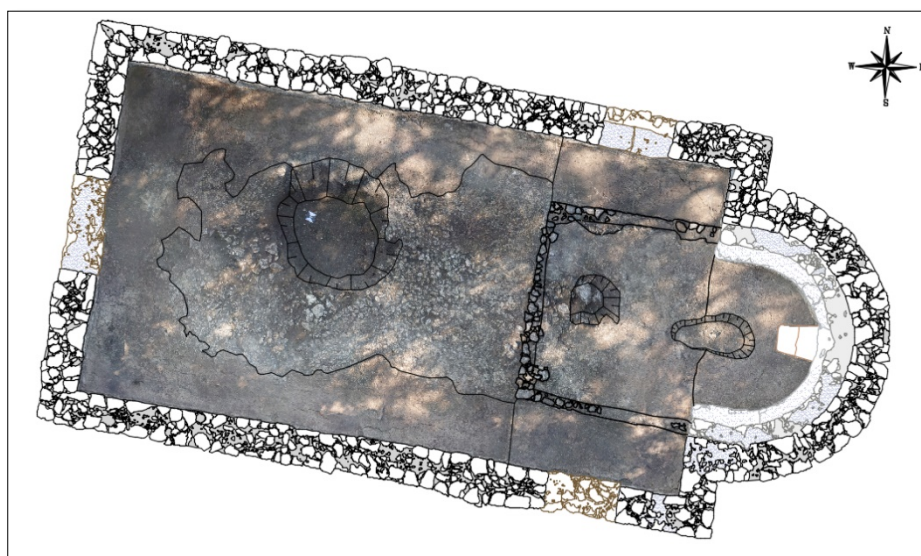
Za dokumentiranje većih površina 3D modelom, poput sondi ili objekata, sve češće se koriste bespilotni zrakoplovi (Vuković 2015:13-19). Kod korištenja bespilotnih zrakoplova za dokumentiranje arheoloških nalazišta, potrebno je izraditi plan leta, kako bi 3D model bio zadovoljavajuće kvalitete. Zračne fotografije unose se u računalni program, a možemo ih georeferencirati na nekoliko načina: korištenjem podataka fotoaparata koji ima ugrađen GNSS, GNSS podatcima o ruti letenja i poziciji fotografije sa same letjelice ili uz pomoć foto-točaka (Vuković 2015:19).



Slika 15: Ortomozaik tlocrta crkve dobiven iz 3D modela izrađenog preko zračnih fotografija; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)

Zračne fotografije omogućuju nam izradu 3D modela i tlocrtnih prikaza arhitektonskih ostataka bez obzira na njihovu površinu i visinu u kojoj su očuvani (sl 15). Osim toga, moguće je dodatno fotografirati poglede na zidove te kombinacijom tih i zračnih fotografija napraviti 3D model iz kojeg možemo dobiti više ortomozaika, npr. jedan za računalno crtanje tlocrtne situacije (sl. 16) te nekoliko njih za poglede na zidove.

Slika 16:
Primjer nacrtne dokumentacije tlocrta crkve; Generalski Stol - Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)



Osim modeliranja na temelju fotografija, u arheologiji se koristi i lasersko skeniranje za izradu nacrtne dokumentacije (sl 17).



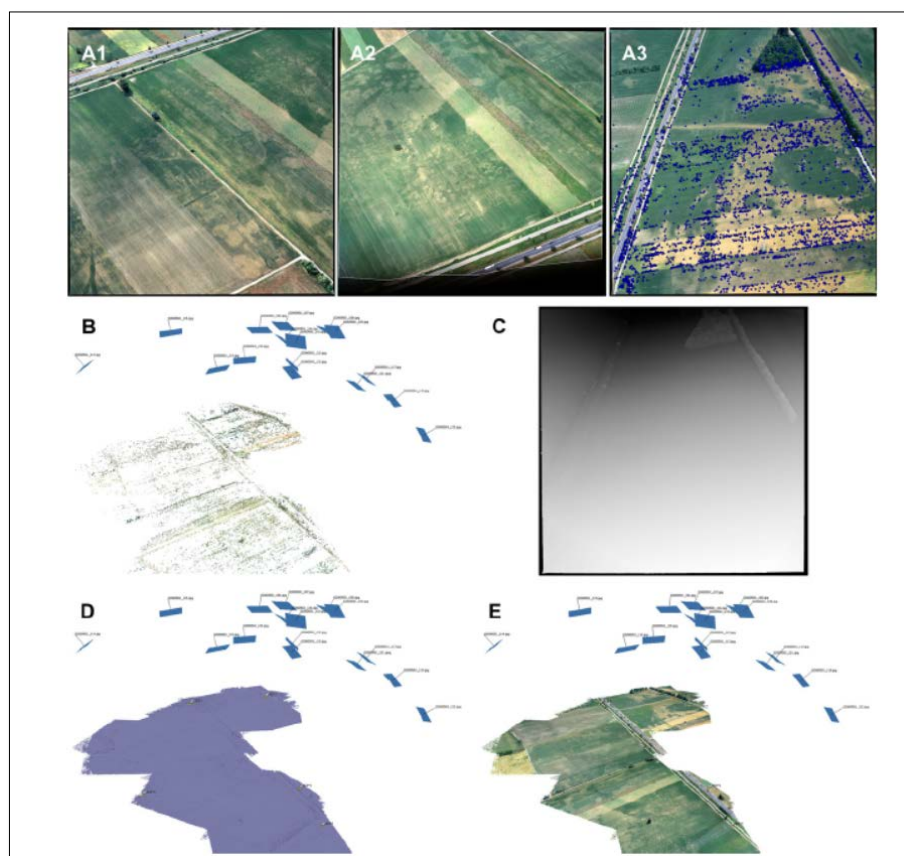
Slika 17: 3D lasersko skeniranje, ortofoto iz oblaka točaka; Generalski Stol - Bukovlje - Crkvišće (HRZ, izrada Vektra, 2012)

Iako je preciznost laserskih skenera veća od modeliranja na temelju fotografija, a noviji laseri nude i mogućnost izrade tekture iz fotografija, najveći nedostatak je njihova cijena. Također, kako skeniranja ugl. provode geodeti, modeliranje na temelju fotografija omogućuje arheolozima jednostavno dokumentiranje terenskih situacija za koje nije potreban izlazak geodeta na teren. S druge strane, arheolozi se kod 3D digitalizacije kulturne baštine i izrade nacrtne situacije mogu naći u različitim situacijama te je potrebno unaprijed odrediti koji je pristup najbolji, odnosno korištenje 3D skenera može biti jednostavniji, iako skuplji, pristup 3D digitalizaciji.

Osim za dokumentiranje predmeta ili objekata, 3D modeli koriste se i za dokumentiranje krajolika, odnosno za daljinska istraživanja. U arheologiji se već dugi niz godina koriste zračne fotografije za daljinska istraživanja, a 3D modeli omogućuju nove pristupe kod obrade podataka te njihove vizualizacije. Također, dobiveni podatci mogu se koristiti za mapiranje te kontroliranje/nadgledanje arheoloških nalazišta (Hesse 2010:67).

Zračno lasersko skeniranje koristi se u arheologiji za izradu preciznih modela reljefa (Doneus et al. 2007). Obradom podataka dobivenih laserskim skenerom, odnosno njihovom klasifikacijom, moguće je ukloniti vegetaciju, a rezultat je detaljna topografska karta na kojoj mogu biti vidljive arheološke strukture (Doneus et al. 2007).

3D modeli dobiveni iz fotografija (sl. 18) i u ovom slučaju pružaju cjenovno pristupačniju alternativu laserskom skeniranju. Fotogrametrijskim principima moguće je dobiti 3D model krajolika iz zračnih fotografija, a prednost je što je 3D modele moguće izraditi i iz fotografija koje nisu snimljene u svrhu izrade 3D modela (Cantoro 2015:119).



Slika 18: Izrada 3D modela iz zračnih fotografija (preuzeto iz: Verhoeven et al. 2012:2064, *Fig. 3*)

Prostorne podatke dobivene iz 3D modela moguće je analizirati i obrađivati na različite načine u drugačijim računalnim programima, te se otvara mogućnost za izradu raznih karata i vizualizacija podataka, koje se mogu nadopunjavati ili uspoređivati te poslužiti kao temelj za stvaranje arheoloških interpretacija.

3.2. 3D REKONSTRUKCIJA

Seviljski principi (*eng. The Seville Principles – International Principles of Virtual Archaeology*), dokument je koji, osim što donosi određene kriterije za korištenje moderne tehnologije unutar arheologije, definira i različite vrste virtualnih modela koji se koriste u arheologiji.

U dokumentu se tako razlikuju 4 vrste virtualnih modela:

1. Virtualna obnova (*eng. virtual restoration*) – korištenje virtualnog modela za premještanje postojećih materijalnih ostataka te prikazivanje kako je nešto izgledalo u prošlosti. Uključuje virtualnu anastilozu.
2. Virtualna anastiloza (*eng. virtual anastylosis*) – spajanje više postojećih dijelova u virtualni model, odnosno u cjelinu.
3. Virtualna rekonstrukcija (*eng. virtual reconstruction*) – korištenje virtualnog modela kako bi se virtualno prikazala građevina ili objekta, iz bilo kojeg trenutka u ljudskoj povijesti na temelju postojećih, fizičkih dokaza te dokaza dobivenih znanstvenim metodama, npr. arheološko istraživanje.
4. Virtualna reprodukcija (*eng. virtual recreation*) – korištenje virtualnog modela za virtualno prikazivanje arheoloških nalazišta u bilo kojem trenutku povijest, uključujući i pokretnu i nepokretnu kulturnu baštinu, okoliš, krajolik, običaje i sl. (Seviljski principi 2011:3).

Prema definiciju koju donosi dokument, virtualna arheologija je znanstvena disciplina koja proučava i razvija korištenje računalnih vizualizacija za upravljanje arheološkom baštinom (Seviljski principi 2011:3), no ne donosi nikakve zaključke o 3D digitalizaciji i korištenju virtualnih modela za stvaranje arheološke dokumentacije.

Virtualnu obnovu i anastilozu možemo povezati s izradom 3D modela nalaza, kad npr. od više fragmenata keramike, koje smo digitalizirali, virtualno složimo keramičku posudu te prikažemo kako je ona nekad izgledala u stvarnosti. S druge strane, virtualnu rekonstrukciju i virtualnu reprodukciju vežemo uz arheološka nalazišta te je za izradu virtualnih prikaza potrebna interpretacija svih poznatih znanstvenih činjenica o nalazištu ili objektu kojeg pokušavamo prikazati. Virtualna reprodukcija je, po definiciji, širi pojam od virtualne rekonstrukcije, te nju možemo povezati s izradom različitih animacija koje prikazuju život na arheološkom nalazištu u određenom vremenu u povijesti.

U literaturi ne postoji ujednačenost termina vezanih za 3D modele, a najčešće se za sve modele dobivene računalom, koji virtualno prikazuju predmete, građevine ili nalazišta, u određenom trenutku u povijesti, koristi pojam 3D rekonstrukcija. Važno je razlikovati ovakvu vrstu modela od modela dobivenih 3D digitalizacijom nalaza ili nalazišta. 3D modele dobivene digitalizacijom, stvara računalni program na temelju podataka koji su uneseni u program, npr. fotografije i uz pomoć matematičkih algoritama, dok se kod stvaranja 3D rekonstrukcija koriste računalni programi gdje osoba na računalu digitalno crta, odnosno stvara trodimenzionalni oblik bilo kojeg objekta. Također, u takvim programima može se manipulirati 3D modelom dobivenim digitalizacijom (sl. 19).



Slika 19: Primjer 3D rekonstrukcije (B) na temelju 3D modela dobivenog tehnikom IbM-a (A) (preuzeto iz: Horňák 2017b:73,75, Fig. 51 i 53)



3D rekonstrukcija unutar arheologije koristi se od 80-ih godina prošlog stoljeća, no razvoj računala, računalne grafike i računalnog vida te niže cijene računalnih programa i dobro opremljenih računala, utjecali su na sve veći broj 3D rekonstrukcija. Mnoge 3D rekonstrukcije proizvodi su suradnje arheologa i stručnjaka iz područja informatičke tehnologije, a kao i kod mnogih drugih računalnih programa u arheologiji, računalni programi, koji se koriste za izrade 3D rekonstrukcija, nisu primarno namijenjeni arheologiji.

U računalnoj grafici pojam 3D modeliranje označava stvaranje matematičkog prikaza trodimenzionalnog oblika nekog predmeta (Vaughan 2012:4). Pojmovi *solid modeling* i *surface modeling*, koriste se za različite tehnike izrade 3D modela (Wood i Chapman 2005:77). U *solid modelingu* postoje dva glavna načina za prikazivanje čvrstih tijela: *constructive solid geometry* (CSG) i *boundary representation* (B rep). CSG model se sastoji od primitivnih geometrijskih oblika poput kocke, kugle ili cilindra, koji se kombiniraju kod stvaranja 3D prikaza objekta, dok je čvrsto tijelo kod B rep modela prikazano rubnim linijama. U oba slučaja, računalni program ima informacije o fizičkim značajkama stvorenog objekta, npr. volumen (Wood i Chapman 2005:77). *Surface modeling* je tehnika stvaranja 3D modela uz pomoć mreže linija, a 3D model izgleda kao čvrsto tijelo, no računalni program ima informacije samo o površini objekta te za razliku od *solid modelinga*, ovakvi prikazi ne sadrže podatke o volumenu (Wood i Chapman 2005:77). Takve modele možemo podijeliti na tri tipa: poligonalni modeli, NURBS površine i *subdivision* površine (eng. *subdivision surfaces*) (Vaughan 2012:102).

Poligonalni modeli su geometrijski oblici koji se sastoje od točaka koje definiraju površinu 3D modela, a model se obično sastoji od nekoliko tisuća poligona (Vaughan 2012:108). NURBS (eng. *Non-Uniform Rational B-Splines*) površina je glatki *mesh* definiran nizom spojenih krivulja (Vaughan 2012:109), a *subdivision* površina (*SubD*), odnosno površina nastala podjelom poligona, je stvaranje glatke, zakrivljene površine iz grubog, poligonalnog *mesha*, odnosno *base mesha* (Vaughan 2012:112). Također, danas postoji mnogo načina na koji se mogu izraditi ovakvi 3D modeli, poput primitivnog modeliranja, *patch* modeliranja, *digital sculpting* i 3D skeniranje (Vaughan 2012:122-133).

Primjeri 3D rekonstrukcija, koje možemo vidjeti u tiskanim publikacijama, nisu 3D modeli, već renderirane slike 3D modela napravljenog na računalu (sl. 20, 21). Renderiranje (eng. *rendering*) je pojam koji označava stvaranje dvodimenzionalnih, osjenčanih slika iz 3D računalnih modela (Shirley et al. 2005:2).



Slika 20: Primjer 3D rekonstrukcije - Felix Romana, Gamzigrad (preuzeto iz: Rejdovianova et al. 2017:37, Fig. 12)



Slika 21: Primjer 3D rekonstrukcije - Stari Perkovci-Sela, 2016 (autor: Marin Mađerić)

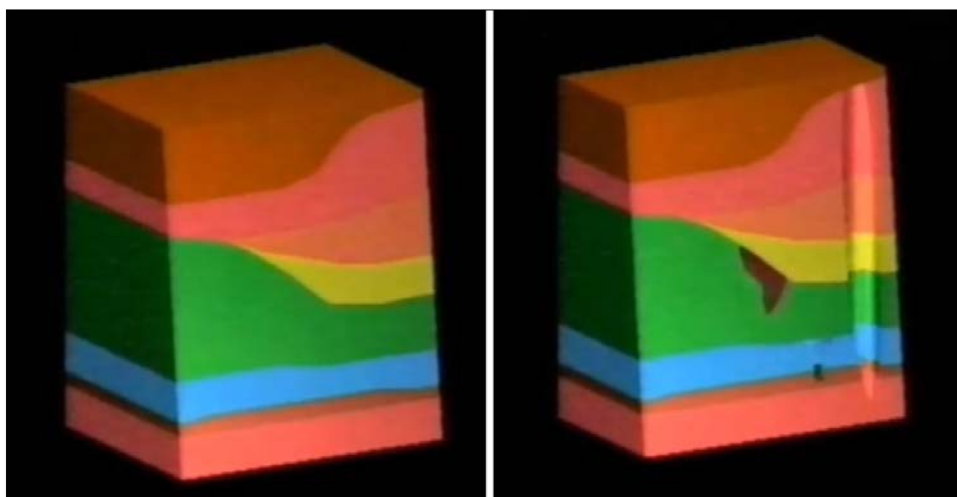
S druge strane, 3D rekonstrukcije moguće je prikazati i uz pomoć animacija. Animacija je niz slika, koje se brzo izmjenjuju kako bi stvorile iluziju kretanja te se često koristi kod arheoloških 3D rekonstrukcija. Većina animiranih rekonstrukcija je „*walk-through*“ ili „*fly through*“ s unaprijed određenim pogledima na 3D rekonstrukciju, odnosno osoba koja izrađuje animaciju, unaprijed određuje poglede na rekonstrukciju te će samo oni biti vidljivi. *Real-time rendering* omogućuje mijenjanje pogleda na 3D model po želji osobe koja gleda 3D model na računalu (Lock 2003:153).

Solid modeling tehnike za prikazivanje arheoloških nalazišta počele su se koristiti sredinom 80-ih godina 20. st. Početak su bili jednostavni 3D animirani prikazi razvoja nalazišta kroz vrijeme, a kroz nekoliko godina počinju se raditi 3D modeli u kojima se koriste razni efekti, kako bi oni izgledali što realnije te su uskoro omogućeni i animirani obilasci arheoloških nalazišta, kako bi šira javnost dobila što bolju sliku odnosa između postojećih arheoloških ostataka na nalazištu (Reilly 1991:134).

Mogućnosti računalne grafike za prezentaciju nalazišta u 3D obliku, otvorile su nova pitanja o korištenju računala u arheologiji te je 1991. godine, P. Reilly u arheologiju uveo pojam virtualne arheologije (Reilly 1991). Virtualna arheologija, kako je primarno zamišljena, trebala je označavati korištenje nove tehnologije za stvaranje nove vrste arheološke dokumentacije, interpretacije i bilježenja arheoloških materijala i procesa, odnosno kao posrednica između ustaljenih, analognih arheoloških procesa i digitalne tehnologije (Beale i Reilly 2015:122). Također, 90-te godine 20. st. razdoblje je kad se u europskoj arheologiji raspravlja o prijetnjama kulturnoj baštini, poput uništavanja kulturne baštine, neovlaštenim istraživanjima, istraživanjima bez stručnog nadzora, ali i očuvanju i prezentaciji baštine *in*

situ. Kako bi se spriječilo uništavanje kulturne baštine, 1992. godine prihvaćena je, od strane Europskog Vijeća, *The Valletta Convention/La Valletta Convention*, koja je stupila na snagu 1995. godine. Nadalje, arheološka istraživanja shvaćaju se kao destruktivna arheološka metoda (Barker 1993:1) te se taj problem pokušava izbjeći naglašavanjem da metode istraživanja i zapisivanja arheoloških podataka, utječu na završnu interpretaciju (Baele i Reilly 2015:121). Virtualna arheologija trebala je ponuditi rješenje za te probleme, odnosno omogućiti očuvanje kulturne baštine i arheoloških procesa u digitalnom obliku (Baele i Reilly 2015:122).

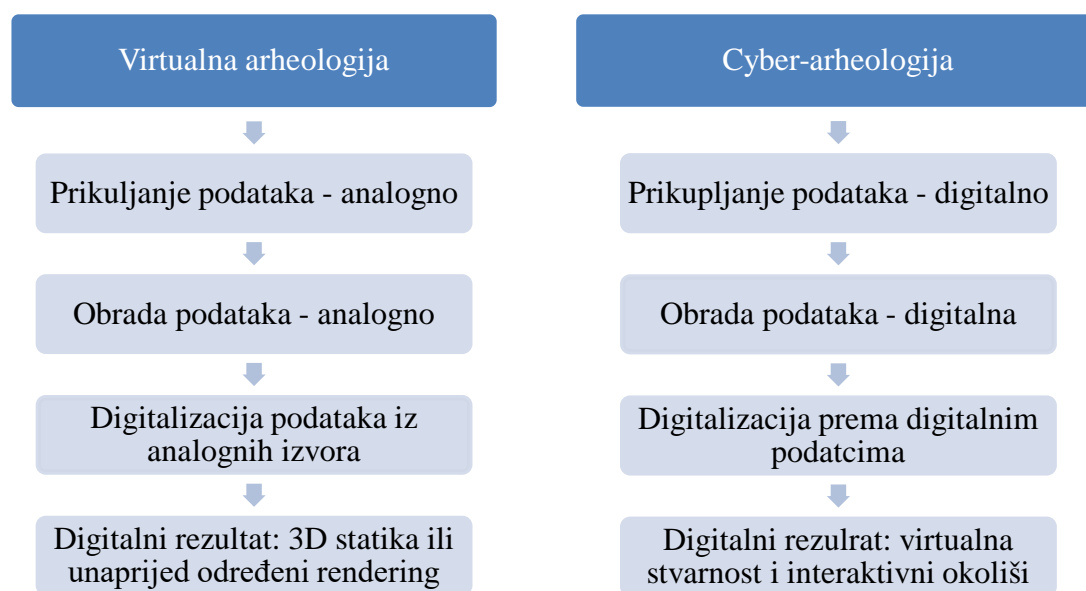
Animirani 3D model zamišljenog arheološkog nalazišta „Grafland“ (sl. 22), predstavljen 1990. godine na CAA konferenciji (Reilly 1991:136), prvi je primjer pojma virtualne arheologije, na način kako je ona zamišljen od strane P. Reillya. 3D model je ustvari bio simulacija arheološke stratigrafije te njihovih odnosa (Reilly 1991:136), a cilj je bio predstaviti nove mogućnosti bilježenja arheološke stratigrafije i ostalih podataka o istraživanju, koji se mogu istraživati, procjenjivati i koji nude mogućnost rasprave u nedestruktivnom kontekstu (Beale i Reilly 2015:122).



Slika 22: Model „Grafland“, isječci iz videa (preuzeto sa: <https://vimeo.com/66955158>; Reilly 1991)

Danas, u literaturi, pojam virtualna arheologija obično opisuje korištenje 3D računalne grafike u arheologiji (Baele i Reilly 2015:122), no Reilly naglašava da je virtualna arheologija zamišljena kao pojam koji obuhvaća puno više mogućnosti korištenja moderne tehnologije, a ne samo statične 3D rekonstrukcije (Baele i Reilly 2015:122; Reilly 2015:12).

S druge strane, neki autori počinju koristiti pojam cyber-arheologija. Cyber-arheologija smatra se nasljednicom virtualne arheologije, koja se ugl. povezuje s 3D modelom ili 3D rekonstrukcijom prošlosti, dok cyber-arheologija opisuje stvaranje virtualnih 3D modela te virtualnih odnosa između stvorenih 3D modela (Forte 2010:76; Forte 2015:1-2). M. Forte opisuje cyber-arheologiju kao proces koji omogućuje interpretaciju i učenje kroz interakcije s 3D modelom, koji prikazuje specifični socijalno-kulturni kontekst (Forte 2015:2), odnosno cilj cyber arheologije je simulacija prošlosti, a ne rekonstrukcija (Forte 2014:119) Također, virtualnu i cyber-arheologiju možemo razlikovati i po procesu rada (sl. 23).



Slika 23: Proces rada virtualne i cyber-arheologije (prema Forte 2014:118)

Današnja tehnologija, ponajviše virtualna i proširena stvarnost, omogućuje sofisticiranije simulacije prošlosti te veću interakciju s 3D modelom, na način koji nije mogao biti zamišljen u 90-im godinama 20. st.

Virtualna stvarnost (eng. *virtual reality*) označava korištenje računalne grafike i drugih alata za interakciju, kako bi se korisniku omogućio osjećaj interakcije s nekim alternativnim okruženjem, a uključuje simulaciju vizualnih, zvučnih i taktilnih osjetila (Fisher et al. 2005:324) (sl. 24).



Slika 24: Renderirane slike iz modela virtualne stvarnosti (preuzeto iz: Sanders 2014:34, Fig. 3)

Proširena stvarnost (eng. *augmented reality*) ne zamjenjuje stvarni svijet kao virtualna stvarnost, već ga „proširuje“, odnosno korisnik može gledati svijet unaprijeđen 3D grafikom koja je postavljena u njegovom vidnom polju, npr. na pametnom telefonu ili tabletu (Fritz et al. 2005) (sl. 25).



Slika 25: Primjer proširene stvarnosti (preuzeto sa: <https://www.vi-mm.eu/2017/03/13/athens-time-walk-a-virtual-experience-back-in-time/>)

Korištenje ovakve moderne tehnologije i računalne grafike, otvara mnoge nove mogućnosti za arheologiju, od novih principa dokumentiranja do prezentacije nalazišta, no takav pristup ima i svojih nedostataka.

4. PREDNOSTI I NEDOSTACI 3D MODELA

3D modeli u arheologiji imaju široku primjenu i mogu uvelike olakšati prikupljanje i prezentiranje podataka s arheoloških istraživanja, no nije realno očekivati da će 3D modeli uskoro postati svakidašnja praksa na istraživanjima.

Prvi nedostatak, koji se veže i za 3D digitalizaciju i 3D rekonstrukciju, jesu financijske mogućnosti. Iako su 90-ih godina 20. st., računala i računalni programi bili „slabiji“ od današnjih verzija, a njihova cijena veća i dalje su cijene određenih računalnih programa prevelike u odnosu na sredstva kojima se financira arheologija i arheološka istraživanja. Naravno, za takve računalne programe potrebna su i dobro opremljena računala, na kojima će se ti programi moći koristiti. S obzirom na to da danas u Hrvatskoj postoje različite institucije, privatne tvrtke i udruge koje provode istraživanja, teško je očekivati da će svatko od njih imati sredstva za izrade 3D modela, bilo digitalizacije ili rekonstrukcije.

Drugi, općeniti nedostatak korištenja 3D modela u arheologiji je i educiranost osoba koje rade 3D modele. Danas se često govori o informatičkoj pismenosti i iako se može pretpostaviti da većina arheologa posjeduje osnovno znanje o računalima, korištenje računalnih programa za 3D digitalizaciju i 3D rekonstrukciju ipak zahtjeva naprednije znanje o računalima i programima. U slučaju da 3D modele izrađuje osoba koja nije arheolog, ali se razumije u računala, nedostatak je svakako što ta osoba možda neće napraviti 3D model koji će zadovoljiti potrebe arheološke struke.

4.1. 3D DIGITALIZACIJA

Arheološko iskopavanje je destruktivna metoda, kojom se nepovratno uništava nalazište, kako bi se dobile nove spoznaje o njemu (Barker 1993:1). Upravo iz tog razloga, arheološka dokumentacija važan je dio svakog iskopavanja.

Prikupljanje podataka potrebnih za izradu 3D modela (fotografije i koordinatne točke), zahtjeva manje vremena od izrade terenskih crteža, što znači da se na samom iskopavanju više vremena može posvetiti istraživanju te ono ne mora stati zbog ponekad dugog procesa terenskog crtanja. Nadalje, izrađen 3D model je digitalna replika stvarne situacije te sadrži podatke o njenom položaju u prostoru, odnosno stvorena je replika koja, u digitalnom obliku, prikazuje situaciju koja možda, zbog primjene destruktivne metode istraživanja, više ne

postoji na nalazištu. Osim toga, ovakva vrsta 3D modela omogućuje izradu nacrtne dokumentacije koja je, zbog prikupljenih koordinatnih podataka uz pomoć npr. totalne stanice, preciznija od terenskog crtanja te omogućuje jednostavno preklapanje s drugim, digitalnim, nacrtima nalazišta. Prednost je što se i starije zračne fotografije, snimljene za izradu fotomozaika u CAD programima, mogu ponovo iskoristiti za stvaranje 3D modela (Miloglav 2017:71).

Također, osim izrade 3D modela određenih terenskih situacija, 3D digitalizacija omogućuje izradu digitalnih replika cijelog nalazišta, što je izuzetno važno u slučajevima kad nalazišta ne mogu biti sačuvana ili se nalaze na teško dostupnim mjestima (npr. podvodna nalazišta).

Važno je napomenuti da 3D digitalizacija omogućuje i dokumentiranje arheološkog iskopavanja po fazama, odnosno moguće je izraditi 3D model nakon uklanjanja svake stratigrafske jedinice. Takvi 3D modeli mogu biti temelj za izradu različitih animacija ili simulacija koje prikazuju tijek arheoloških iskopavanja, koji bi pak arheolozima, koji nisu sudjelovali na iskopavanjima, omogućili uvid u tehnike istraživanja te otvorili mogućnost za drugačije interpretiranje nalazišta.

Iako postoji mnogo mogućnosti za korištenje ovakve vrste 3D modela za dokumentiranje kulturne baštine, u hrvatskoj arheologiji 3D modeli nisu prepoznati kao oblik dokumentacije. Čak i u slučajevima kad se izradi 3D model nalazišta ili istražene situacije, on služi samo za izradu 2D nacrt, odnosno onoga što se smatra arheološkom dokumentacijom. Osim toga, u hrvatskoj arheologiji ne postoje određeni standardi terenske dokumentacije, a u Pravilniku o arheološkim istraživanjima stoji: *„voditelj arheoloških istraživanja dužan je osigurati obavljanje iskopavanja prateći stratigrafsku strukturu nalazišta, što je potrebno i odgovarajuće dokumentirati“*, dok se za dokumentaciju arheoloških istraživanja navodi: *„sastoji se od nacrtne dokumentacije nalazišta s prikazom apsolutnih kota nađenih struktura (tlocrti, presjeci i pogledi), terenskih popisa (stratigrafske jedinice, pokretni nalazi, uzorci i dr.), fotodokumentacije (cjelina i dijelovi nalazišta te pojedinačni nalazi) te terenskog dnevnika u koji se unose svi podaci o istraživanjima i dnevnim događajima koja su važna za istraživanje“* (Pravilnik 2010: čl.4, čl.12). U Pravilniku se 3D modeli kao oblik dokumentacije uopće ne spominju, dok se kao nedestruktivne arheološke metode navode samo geofizika i aeroarheologija, iako i laserska skeniranja te 3D modeli izrađeni na temelju fotografija, također spadaju u nedestruktivne arheološke metode. Uzme li se u obzir ovakvo šturo definiranje arheološke dokumentacije, ne priznavanje 3D modela kao oblika dokumentiranja

te spomenuti nedostaci korištenja 3D modela, odnosno financije i educiranost arheologa za korištenje računala i računalnih programa, ne može se očekivati da će dokumentiranje tijeka arheološkog iskopavanja, u obliku 3D modela, postati standard u bliskoj budućnosti.

Jedan od nedostataka 3D modela, o kojem se rijetko raspravlja u literaturi, je veličina datoteka, odnosno prostor koji 3D modeli zauzimaju na računalu. Npr. 3D model izrađen u računalnom programu *Agisoft Photoscan*, može biti veličine od nekoliko gigabajta²⁰, u slučaju da se dokumentira velika površina. Osim toga, da bi se iz modela mogli izvesti podatci (eng. *data export*), potrebno je u računalu imati pohranjene fotografije iz kojih je napravljen 3D model. U slučaju da 3D modeli postanu standard arheološke dokumentacije, trebalo bi razriješiti problem njihove pohrane. Općenito gledajući, današnja tehnologija nudi nam mogućnosti pohranjivanja velikih količina podataka; kod novijih osobnih računala kapacitet memorije mjeri se u terabajtima²¹, no, ovdje se opet vraćamo na problem financija. Nadležne institucije, poput konzervatorskih odjela i Ministarstva kulture, trebale bi biti opremljene serverima na koje bi se mogle pohranjivati velike količine podataka, a osim toga trebali bi imati i računalne programe koji bi im omogućavali pregled takve vrste dokumentacije. Također, pošto je 3D dokumentacija digitalna, zahtijevala bi održavanje, odnosno u slučaju da se u tehnologiji pojave novi oblici medija za pohranu podataka (npr. kao što je bila pojava CD-a, koji su zamijenili korištenje disketa), postojeći podatci trebali bi se prilagoditi novoj tehnologiji, kako ne bi bili izgubljeni.

Osim problema pohrane podataka, otvaraju se pitanja o količini prikupljenih podataka. Razvoj moderne tehnologije omogućuje prikupljanje većeg broja podataka no ikad prije, a s druge strane čini se kao da uvijek nedostaje podataka (Zubrow 2006:21). Upravo zbog toga, kod arheološkog dokumentiranja bitno je odrediti što i zašto dokumentiramo (Miloglav 2017:73). Nadalje, uz digitalnu arheologiju i 3D modele možemo povezati i problem „digitalnih igračaka“ (Zubrow 2006:21). Nabavljanje skupe opreme za dokumentiranje, samo zato što je popularna, ne znači da će arheološka dokumentacija biti bolja od dokumentacije napravljene uz pomoć npr. *open-source* računalnih programa (Miloglav 2017:60).

Uz to, jedan od problema koji možemo povezati s korištenjem 3D modela u arheologiji su i arheološke publikacije, koje su, u većini slučajeva, u tiskanom obliku te arheolozi mogu

²⁰ Jedinica za mjerenje kapaciteta memorijskog prostora (http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=fFdiURQ%3D&keyword=gigabajt; pristup: 6.6.2018), jedan gigabajt sadrži 1024 kilobajta

²¹ 1 terabajt sadrži 1024 gigabajta.

objaviti samo 2D prikaz 3D modela, ali ne i sam 3D model. Ovom problemu može se doskočiti prilaganjem CD-a tiskanoj publikaciji, no danas korištenje CD-a i DVD-a, kao medija za pohranu podataka, postaje sve rjeđe, tako da se ovim načinom ne može dugoročno riješiti problem objavljivanja 3D modela. S druge strane, digitalne objave omogućuju prilaganje 3D modela uz tekst i njihov prikaz na računalu, no takve objave, iako živimo okruženi modernom tehnologijom, nisu česta pojava.

4.2. 3D REKONSTRUKCIJA

O mogućnosti primjene 3D modela i moderne tehnologije u arheologiji, raspravlja se već od kraja 20. st. Nakon što su, uz pomoć računalnih stručnjaka, arheolozi počeli izrađivati 3D rekonstrukcije, primarno za prezentaciju nalazišta, P. Reilly predlaže korištenje takve tehnologije i za simulacije arheoloških terena (Reilly 1991). Pojavom virtualne i proširene stvarnosti, odnosno razvojem računalne grafike, mogućnosti postaju sve veće, a 3D modeli sve realniji.

Prednost 3D rekonstrukcija je njihova uloga u prezentiranju nalaza i nalazišta široj javnosti, odnosno, osobama koje ne poznaju dovoljno arheološku građu, prikazati kako je nešto stvarno izgledalo u prošlosti. Danas se to može postići uz renderirane fotografije i animacije, koje ne nude interakciju korisnika i 3D modela te kroz virtualnu i proširenu stvarnost, gdje je naglasak na interakciji. Ovakva vrsta 3D modela najviše se koristi u muzejima ili na nalazištima koja su otvorena za posjetitelje, odnosno njihova uloga u arheologiji nije znanstvene, već je prezentacijske naravi. Takve 3D rekonstrukcije najčešće su idejni prikazi i nastaju na temelju interpretacije podataka dobivenih arheološkim istraživanjima.

Iako 3D rekonstrukcije u hrvatskoj arheologiji možemo najčešće vidjeti kroz renderirane fotografije i animacije, moguće ih je prikazati i kroz virtualnu i proširenu stvarnost. Renderirane fotografije moguće je objaviti u tiskanom obliku, dok je animacije moguće prikazati na svakom računalu ili televizoru, tehnologiji koju većina muzeja posjeduje. Međutim, virtualna stvarnost, tehnologija koja implementira korisnikova osjetila u umjetno stvoreno okruženje, zahtjeva korištenje stereoskopskih uređaja ili CAVE sistema (*eng. Cave Automatic Virtual Environment*) (Šugar 2018:7), dok se za korištenje proširene stvarnosti danas najčešće koriste pametni telefoni i tableti. Takva vrsta tehnologije zahtjeva financijska sredstva, koje većina muzeja ne posjeduje, a uz to, potrebno je platiti i izradu modela. U

slučaju proširene stvarnosti, moguće je potrebne podatke dostaviti korisnicima na njihove pametne telefone ili tablete, preko internetske veze, no to znači da područje gdje želimo omogućiti korištenje proširene stvarnosti, mora biti pokriveno jakim signalom, što u slučaju nekih nalazišta, nije moguće. Također, danas postoje interaktivne aplikacije vezane za kulturnu baštinu, koje je moguće preuzeti na pametne telefone, no u slučaju *Androida*, takve aplikacije ne prelaze broj od 500 preuzimanja (Tasić 2017a:15)²².

Također, N. Tasić navodi da su ciljana skupina korisnika, za ovakve aplikacije, takozvani *millennials*²³, koji su odrasli okruženi modernom tehnologijom te su naviknuti na virtualne prikaze, a nemogućnost interakcije s 3D modelom za njih predstavlja nedostatak, odnosno jednostavne 3D rekonstrukcije neće probuditi njihovu znatiželju (Tasić 2017b:83).

S druge strane, iako se ovakvi 3D modeli najviše koriste u prezentacijske svrhe, njihova primjena u arheologiji može biti veća. 3D skeneri ili modeliranje na temelju fotografija, omogućuje nam izradu 3D modela npr. fragmenata keramike, koji se, uz pomoć računalnog programa, mogu „spojiti“ u cjelinu, odnosno moguće je izraditi 3D model posude, koji prikazuje kako je ona stvarno izgledala u određenom trenutku u prošlosti. Osim toga, takav se pristup može primijeniti i na druge pokretne nalaze, ali i na očuvanu arhitekturu na nalazištu, npr. u slučaju da se za vrijeme iskopavanja pronađu dijelovi urušene arhitekture, moguće je pomoću 3D modela prikazati njihov odnos s postojećom arhitekturom. Za razliku od idejnih prikaza, ovakvi 3D modeli omogućuju arheologu promatranje materijalnih ostataka na nov način, drugim riječima, takve 3D vizualizacije mogu biti pomoć kod interpretacije i obrade podataka.

Nadalje, kod izrade 3D rekonstrukcija nalazišta ili nekih njegovih dijelova, rijetko se nudi više od jedne interpretacije (Lock 2003:155). Koliko god da se arheolog trudi biti objektivan u interpretaciji podataka, idejni prikaz ipak posjeduje dozu subjektivnosti. U slučaju da arheolog ponudi više od jedne interpretacije te ih prikaže kroz 3D modele, primjena 3D rekonstrukcija u arheologiji, ne mora biti samo u svrhu prezentacije. Više mogućih interpretacija, prikazanih kroz 3D rekonstrukcije, otvaraju mogućnost rasprave unutar arheološke zajednice, koja može dovesti do novih zaključaka o nalazištu.

²² N. Tasić spominje aplikaciju „3D Çatal Höyük“ te navodi da je preuzeta manje od 50 puta (Tasić 2017a:16). Pristupom aplikaciji *Trgovina Play* na Android pametnom telefonu, moguće je vidjeti da danas ta aplikacija ima nešto više od 100 preuzimanja. Aplikaciju su ocijenila samo tri korisnika, dvoje sa 5, a jedan korisnik s 1 zvijezdicom (pristup *Trgovini Play*: 7.6.2018.).

²³ Najčešće se koristi za osobe rođene od početka 80-ih do sredine 90-ih godina 20. stoljeća.

Nedostatak, uz već spomenuta financijska sredstva, je svakako što velik broj arheologa nije educiran za izradu 3D rekonstrukcija te se one najčešće izrađuju od strane računalnih stručnjaka, što može utjecati na vjerodostojnost prikaza. Naravno, arheolog može surađivati s osobom koja izrađuje 3D rekonstrukciju, no sam proces izrade 3D modela bio bi jednostavniji i brži da ga izrađuje sam arheolog, koji zna što je i na koji način potrebno prikazati. Neosporivo je da 3D modeli mogu pomoći u shvaćanju i interpretaciji podataka, no upravo iz ovih razloga, teško je očekivati da će ovakav pristup 3D rekonstrukcijama, u bližoj budućnosti, postati standardna metoda u arheologiji.

5. ZAKLJUČAK

3D modeli nisu novost u arheologiji, no razvoj računalne tehnologije od 90-ih godina 20. st. pa nadalje, omogućio je njihovu širu primjenu. Računala i računalni programi postali su jednostavniji za korištenje, povećao se broj mogućnosti za njihovo korištenje u arheologiji, a njihove su cijene postale prihvatljivije za korisnika. Također, razvoj računalne grafike i računalnog vida, omogućio je korištenje fotografija i fotogrametrijskih principa, već ustaljenih metoda u arheologiji, na jedan novi, moderniji način.

3D digitalizacija, bilo da se koriste laserski skeneri ili modeliranje na temelju fotografija, omogućuje brzo prikupljanje podataka na terenu te pomaže u izradi nacrtne dokumentacije. Osim toga, uz pomoć 3D digitalizacije možemo sačuvati digitalne replike nalaza ili nalazišta, koja ne mogu biti sačuvani zbog npr. gradnje različitih infrastruktura te ih, barem u digitalnom obliku, prenijeti idućim generacijama. Također, korištenje 3D digitalizacije i 3D rekonstrukcije zajedno, odnosno virtualnih obnova i anastiloza, otvara se mogućnost izrade vizualizacija koje mogu pomoći arheolozima u boljem razumijevanju prikupljenih podataka te u njihovoj interpretaciji.

3D rekonstrukcija, osim što pomaže kod prezentacije arheoloških nalazišta i nalaza, može se, također, koristiti kao pomoć u arheološkoj interpretaciji.

Nedostatci koji se vežu uz 3D modele, poput nedovoljno financijskih sredstva, needuciranost arheologa na području informatičke tehnologije ili nemogućnost objavljivanja 3D modela, ustvari nisu nedostatci samih 3D modela, već, u većini situacija, proizlaze iz toga kako arheolozi pristupaju svojoj struci.

Naravno, arheolozi ne mogu utjecati na financijska sredstva kojima se financiraju arheološka iskopavanja, no educiranje novih generacija arheologa na području informatičke tehnologije, nešto je što se može promijeniti. Needuciranost je glavni uzrok neshvaćanja navedene tehnologije, što dovodi do njenog ne prihvaćanja. U Pravilniku o arheološkim istraživanjima, 3D modeli se ne prepoznaju kao oblik dokumentacije, koja je u hrvatskoj arheologiji i dalje čvrsto vezana za 2D prikaze. Također, iako nam 3D skeniranje ili modeliranje na temelju fotografija omogućuje jednostavno i relativno jeftino dokumentiranje postojećih arheoloških nalazišta, bez njihove destrukcije, ovakve metode nisu, u Pravilniku, priznate kao nedestruktivne metode arheoloških istraživanja.

Uz to, prije nego što se može raspravljati o korištenju 3D modela u arheološkoj dokumentaciji, potrebno je, u hrvatskoj arheologiji, jasno odrediti koji su uopće minimalni standardi arheološke dokumentacije.

Prema tome, iako su primjene 3D modela u arheologiji raznovrsne, prije nego što oni postanu općeprihvaćeni, potrebno je promijeniti pristup korištenju tehnologije u arheologiji. Danas se računala uglavnom koriste za pohranu podataka, iako se dio podataka i dalje pohranjuje u papirnatom izdanju, ili kao pomoć za izradu digitalne dokumentacije, koja svoju vrijednost ima jedino u tiskanom, 2D obliku. Arheolozi najčešće koriste 2D prikaze 3D modela, bilo za dokumentaciju, prikaze rekonstrukcija ili objave, a sam 3D model nema nikakvu vrijednost. Računala i računalni programi nisu samo unaprijeđena verzija pisaoćeg stroja i papira te nude mnoge mogućnosti, koje u arheologiji nisu dovoljno iskorištene, zato što tiskani 2D prikazi imaju veću vrijednost od podataka prikazanih samo u digitalnom obliku. Tek kada se u arheologiji prihvati vrijednost digitalnih prikaza podataka, moći će se bolje iskoristiti mogućnosti koje 3D modeli nude.

POPIS SLIKA

Slika 1:	Vizualizacija odnosa između pojmova „vizualizacija“, „vizualizacija podataka“ i „3D vizualizacija“ (izradila V. Gligora)	8
Slika 2:	Odnos pojmova vizualizacije u arheologiji (izradila V. Gligora)	10
Slika 3:	<i>Leica Pegasus – Backpack Werable Mobile Mapping Solution</i> (preuzeto sa: http://bit.ly/2H2J5H0 , pristup: 4.3.2018.)	14
Slika 4:	Podjela laserskih skenera i njihova primjena (preuzeto iz: Boardman i Bryan 2018:8, <i>Table 1</i>)	16
Slika 5:	Raspršen oblak točaka; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, sonda 10 (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	19
Slika 6:	Zbijen oblak točaka; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, sonda 10 (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	19
Slika 7:	<i>Mesh</i> ; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, sonda 10 (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	20
Slika 8:	Tekstura; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće, sonda 10 (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	20
Slika 9:	Vertikalna fotografija kostura s foto-točkama (preuzeto iz: Sirovica 2009:36, autor D. Tresić Pavičić)	21
Slika 10:	3D model groba; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	22
Slika 11:	Ortomosaik uzdužnog presjeka groba; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	22
Slika 12:	Crtanje groba preko ortomosaika; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	23
Slika 13:	Dokumentacija groba izrađena uz pomoć Agisoft Photoscan i AutoCAD računalnih programa; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2017)	23

Slika 14:	Primjer nacrtne dokumentacije pogleda na lice zida; Bijela-samostan sv. Margarete (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)	24
Slika 15:	Ortomozaik tlocrta crkve dobiven iz 3D modela izrađenog iz zračnih fotografija; Generalski stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)	25
Slika 16:	Primjer nacrtne dokumentacije tlocrta crkve; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izradila V. Gligora, 2016)	25
Slika 17:	3D lasersko skeniranje, ortofoto iz oblaka točaka; Generalski Stol-Bukovlje-Crkvišće (HRZ, izrada Vektra, 2012)	26
Slika 18:	Izrada 3D modela iz zračnih fotografija (preuzeto iz: Verhoeven et al. 2012:2064, <i>Fig. 3</i>)	27
Slika 19:	Primjer 3D rekonstrukcije na temelju 3D modela dobivenog tehnikom IBM-a (preuzeto iz: Hornák 2017b:73,75, <i>Fig. 51 i 53</i>)	29
Slika 20:	Primjer 3D rekonstrukcije – Felix Romana, Gamzigrad (preuzeti iz: Rejdovianova et al. 2017:37, <i>Fig. 12</i>)	30
Slika 21:	Primjer 3D rekonstrukcije – Stari Perkovci-Sela, 2016 (autor: Marin Mađerić)	31
Slika 22:	Model „Grafland“, isječci iz videa (preuzeto sa: https://vimeo.com/66955158 ; Reilly 1991)	32
Slika 23:	Proces rada virtualne i cyber-arheologije (prema: Forte 2014:118)	33
Slika 24:	Renderirane slike iz modela virtualne stvarnosti (preuzeto iz: Sanders 2014:34, <i>Fig. 3</i>)	34
Slika 25:	Primjer proširene stvarnosti (preuzeto sa: https://www.vi-mm.eu/2017/03/13/athens-time-walk-a-virtual-experience-back-in-time/)	34

POPIS LITERATURE

Knjige i znanstveni članci

- Beale i Reilly 2015 Beale, Gareth i Paul Reilly. „Additive archaeology: The spirit of virtual archaeology reprinted“. *Archaeological Research in the Digital Age (Proceedings of the 1st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology – Greek Chapter)*. ur. Constantinos Papadopoulos, Eleftheria Paliou, Angeliki Chrysanthi, Eleni Kotoula i Apostolos Sarris. IMS-FORTH, Rethymno, 2015. pp. 120-128.
- Beraldin et al. 2010 Beraldin, J.-Angelo, François Blais i Uwe Lohr. „Laser Scanning Technology“. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. ur. George Vosselman i Hans-Gerd Maas. Whittles Publishing, Dunbeath, 2010.
- Barker 1993 Barker, Philip. *Techniques of Archaeological Excavation*. Routledge, London and New York, 1993. (3. izdanje)
- Brinkmann 1999 Brinkmann, Ron. *The Art and Science of Digital Compositing*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1999.
- Cantoro 2015 Cantoro, Gianluca. „Aerial photogrammetry: when archaeology meets SIFT“. *Recovering lost landscapes*. ur. Vujadin Ivanišević, Tatjana Veljanovski, David Cowley, Grzegorz Kiarszys i Ivan Bugarski. Institute of Archaeology, Belgrade, 2015, pp. 117-128.
- Ceruzzi 2003 Ceruzzi, Paul E. *A History of Modern Computing*, MIT Press, Cambridge, 2003. (2. izdanje)
- Chopine 2011 Chopine, Ami. *3D Art Essentials: The Fundamentals of 3D Modeling, Texturing and Animation*. Elsevier inc., Oxford, 2011.
- Doneus et al. 2007 Doneus, Michael, Christian Brieše, Martin Fera, Ulrike Fornwagner, Monika Griebel, Martin Janner, Maria-Christina Zingerle. „Documentation and analysis of archaeological sites using aerial reconnaissance and airborne laser scanning“. *XXI International CIPA Symposium*. ur. Andreas Georgopoulos. CIPA, 2007.
- Dorrell 1994 Dorrell, Peter. *Photography in Archaeology and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, 1994. (2. izdanje)

- Fisher et al. 2005 Fisher, R.B., K. Dawson-Howe, A. Fitzgibbon, C. Robertson i E. Trucco. *Dictionary of Computer Vision and Image Processing*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2005.
- Forte 2010 Forte, Maurizio. „Participatory Research in Cyber-archeology“. *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 37th International Conference*, 2010:
http://proceedings.caaconference.org/paper/11_forte_caa2009/
(pristup: 29.5.2018)
- Forte 2014 Forte, Maurizio. „Virtual reality, cyberarchaeology, teleinnercive archaeology“. *3D recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage – Theory and best practices (BAR International Series 2598)*. ur. Fabio Remondino i Stefano Campana, 2014:
https://www.academia.edu/5719952/3D_Modeling_in_Archaeology_and_Cultural_Heritage_Theory_and_Best_Practices
(pristup: 29.5.2018.)
- Forte 2015 Forte, Maurizio. „Cyberarchaeology: A Post-Virtual Perspective“. *Between Humanities and the Digital*, 2015:
https://www.academia.edu/6658550/Cyber_Archaeology_a_Post-Virtual_Perspective_-_Updated
(pristup: 29.5.2018.)
- Friendly 2009 Friendly, Michael. *Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics and data visualization*. York University, 2009:
<http://www.math.yorku.ca/SCS/Gallery/milestone/milestone.pdf>
(pristup: 1.3.2018.)
- Fritz et al. 2005 Fritz, F, A. Susperregui i M. T. Linaza. „Cultural Tourism experiences with Augmented Reality Technologies“. *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, 2005:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.622.4265&rep=rep1&type=pdf>
(pristup: 29.5.2018.)
- Gajski 2007 Gajski, Dubravko. „Osnove laserskog skeniranja iz zraka“. *Ekscentar*, No. 10. Geodetski fakultet, Zagreb, 2007, pp. 16-22.
- Golek et al. 2012 Golek, Darko, Dino Dobrinić i Branko Kordić. „Usporedba terestričkih laserskih skenera“. *Ekscentar*, br. 15. Geodetski fakultet, Zagreb, 2012, pp. 54-61.

- Hesse 2010 Hesse, Ralf. „LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection“. *Archaeological Prospection* 17, 2010, pp. 67-72.
- Historic England 2017 Historic England. *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*. ur. Jon Bedford. Swindon, Historic England, 2017:
<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/> (pristup: 3.3.2018.)
- Historic England 2018 Historic England. *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture*. ur. Clive Boardman i Paul Bryan. Swindon, Historic England, 2018:
<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/> (3. izdanje) (pristup: 3.3.2018.)
- Hornák 2017a Hornák, Milan. „Introduction“. *3D Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage (CONPRA Series, Vol. I)*. ur. Ján Zachar, Milan Hornák i Predrag Novaković. University of Ljubljana, Ljubljana, 2017, pp. 13-14.
- Hornák 2017b Hornák, Milan. „Examples of good practice in 3D visualisation in preventive archaeology“. *Virtual Reconstructions and Computer Visualisations in Archaeological Practice (CONPRA Series, Vol. IV)*. ur. Nenad Tasić, Predrag Novaković i Milan Hornák. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts, Ljubljana, 2017. pp. 69-77.
- Jončić i Zachar 2017 Jončić, Nenad i Ján Zachar. „3D Scanning“. *3D Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage (CONPRA Series, Vol. I)*. ur. Ján Zachar, Milan Hornák i Predrag Novaković. University of Ljubljana, Ljubljana, 2017, pp. 23-32.
- Kraus 2004 Kraus, Karl. *Photogrammetry*. Walter de Gruyter, Berlin – New York, 2004.
- Larrivee 1958 Larrivee, Jules A. „A history of computers, I“. *National Council of Teachers of Mathematics*, Vol. 51, No. 6, 1958, pp. 469 – 473.
- Lock 2003 Lock, Gary. *Using Computers in Archaeology: Towards Virtual Past*. Routledge, London, 2003.

- Lowe 1999 Lowe, David G. „Object Recognition from Local Scale-Invariant Features“. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, Corfu, 1999: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>
- Miler et al. 2007 Miler, Mario, Almin Đapo, Branko Kordić, Ivan Medved. „Terestriči laserski skeneri“. *Ekscentar*, No. 10. Geodetski fakultet, Zagreb, 2007, pp. 35-38.
- Miloglav 2017 Miloglav, Ina. „Metodologija istraživanja. Pregled dokumentacijskih tehnika na primjeru sonde Z“. *Tilurium IV. Arheološka istraživanja 2007.-2010. godine*. ur. Vinka Matijević. FF press, Zagreb, 2017, pp. 59-76.
- Quan 2010 Quan, Long. *Image-Based Modeling*. Springer, New York, 2010.
- Reilly 1991 Reilly, Paul. „Towards a Virtual Archaeology“. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990 (BAR International Series 565)*. ur. Sebastian Rahtz i Kris Lockyear. Tempus Reparatum, Oxford, 1991, pp. 132-139.
- Reilly 2005 Reilly, Paul. „Three-dimensional modelling and primary archaeological data“. *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*. ur. Paul Reilly i Sebastian Rahtz. Routledge, New York, 2005, pp. 92-106.
- Reilly 2015 Reilly, Paul. „Putting the materials back into virtual archaeology“. *Virtual archaeology – Methods and benefits (Proceedings of the Second International Conference held at the State Hermitage Museum)*. The State Hermitage Publishers, Saint Petersburg, 2015. pp. 12-23.
- Reilly i Rahtz 2005 Reilly, Paul i Sebastian Rahtz. „Introduction: archaeology and the information age“. *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*. ur. Paul Reilly i Sebastian Rahtz. Taylor & Francis e-Library, 2005, pp. 1-16.
- Rejdovianova et al. 2017 Rejdovianova, Zuzana, Andrej Žitňan, Milan Horňák, Jiri Hrubý i Daniel Hlášek. „Brief overview of examples of VR projects“. *Virtual Reconstructions and Computer Visualisations in Archaeological Practice (CONPRA Series, Vol. IV)*. ur. Nenad Tasić, Predrag Novaković i Milan Horňák. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts, Ljubljana, 2017, pp. 31-39.
- Remondino 2011 Remondino, Fabio. „Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning“. *Remote Sensing*, Vol. 3,

Issue 6, 2011:

<http://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>

(pristup: 3.3.2018.)

- Sanders 2014 Sanders, Donald H. „Virtual Heritage Research and Visualizing the Past in 3D“. *Journal of Eastern Mediterranean Archeology & Heritage Studies*, Vol. 2, No. 1, 2014. pp. 30-47
- Shirley et al. 2005 Shirley, Peter with Michael Ashikhmin, Michael Gleicher, Stephen R. Marschner, Erik Reinhard, Kelvin Sung, William B. Thompson, Peter Willemsen. *Fundamentals of Computer Graphic*. A K Peters, Ltd., Wellesley, 2005. (2. izdanje)
- Sirovica 2009 Sirovica, Filomena. *Načela dokumentiranja arheoloških iskopavanja*. Diplomski rad, Filozofski fakultet Sveučiliša u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- Šošić Klindžić 2015 Šošić Klindžić, Rajna. *Uvod u teorijsku arheologiju – stvaraoči i pravci u 20. stoljeću*. FF Press, Zagreb, 2015.
- Štuhec 2017 Štuhec, Seta. „3D Digital Recording: Basic“. *3D Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage (CONPRA Series, Vol. I)*. ur. Ján Zachar, Milan Horňák i Predrag Novaković. University of Ljubljana, Ljubljana, 2017, pp. 15-22.
- Štuhec i Zachar 2017 Štuhec, Seta i Ján Zachar. „Digital Photogrammetry“. *3D Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage (CONPRA Series, Vol. I)*. ur. Ján Zachar, Milan Horňák i Predrag Novaković. University of Ljubljana, Ljubljana, 2017, pp. 33-51.
- Štular i Štuhec 2015 Štular, Benjamin i Seta Štuhec. *3D Archaeology: Early Medieval Earrings from Kranj*. ZRC Publishing, Ljubljana, 2015.
- Šugar 2018 Šugar, Doris. *Potencijalne primjene virtualne i proširene stvarnosti u arheologiji*. Diplomski rad, Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- Tasić 2017a Tasić, Nenad N. „Introduction to virtual reconstructions“. *Virtual Reconstructions and Computer Visualisations in Archaeological Practice (CONPRA Series, Vol. IV)*. ur. Nenad Tasić, Predrag Novaković i Milan Horňák. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts, Ljubljana, 2017, pp. 13-22.

- Tasić 2017b Tasić, Nenad N. „Augmented reality as an output“. *Virtual Reconstructions and Computer Visualisations in Archaeological Practice (CONPRA Series, Vol. IV)*. ur. Nenad Tasić, Predrag Novaković i Milan Horňák. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts, Ljubljana, 2017, pp. 79-85.
- Vaughan 2012 Vaughan, William. *[digital] Modeling*. Pearson Education Inc, Barkeley, 2012.
- Verhoeven et al. 2012 Verhoeven, G., M. Doneus, Ch. Briese, F. Vermeulen. „Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs“. *Journal of Archaeological Science* 39, 2012, pp. 2060-2070.
- Vuković 2015 Vuković, Miroslav. *Upotreba bespilotnih letjelica u arheologiji*. Diplomski rad, Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- Warden 2009 Warden, Robert. „Towards a New Era of Cultural-Heritage Recording and Documentation“. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, Vol. 40, No. 3/4, 2009, pp. 5-10.
- Wilcock 2005 Wilcock, John. „On the importance of high-level communication formats in world archaeology“. *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*. ur. Paul Reilly i Sebastian Rahtz. Routledge, New York, 2005, pp. 42-47.
- Wood i Chapman 2005 Wood, Jason i Gill Chapman (with contributions by Ken Delooze i Michael Trueman). „Three-dimesional computer visualization of historic buildings – with particular reference to reconstruction modelling“. *Archaeology and the Information Age: A Global Perspective*. ur. Paul Reilly i Sebastian Rahtz. Routledge, New York, 2005, pp. 77-91.
- Zachar i Špehar 2017 Zachar, Ján i Perica Špehar. „3D recording of architecture“. *Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage (CONPRA Series, Vol. I)*. ur. Ján Zachar, Milan Horňák i Predrag Novaković. University of Ljubljana, Ljubljana, 2017, pp. 86-124.
- Zubrow 2006 Zubrow, Ezra B.W. „Digital archaeology: a historical context“. *Digital archaeology-bridging method and theory*. ur. Thomas L. Evans i Patrick Daly. Routledge, London and New York, 2006, pp. 8-26.

Dokumenti

- Pravilnik* *Pravilnik o arheološkim istraživanjima*, Narodne novine broj 102, 2010:
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_08_102_2798.html
(pristup: 6.6.2018.)
- Seviljski principi* *The Seville Principles: International Principles of Virtual Archaeology*, 2011:
<http://smartheritage.com/seville-principles/seville-principles>
(pristup: 23.5.2018.)
- The Valletta Convention* *European Convention on the Protection of the Archaeological Heritage (Revised)*, 1992:
<http://www.coe.int/en/web/conventions/full-list/-/conventions/rms/090000168007bd25>
(pristup: 29.5.2018.)

Elektronički izvori

- Hrvatska enciklopedija* <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=68673>
(pristup: 27.2.2018.)
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=68025>
(pristup: 28.2.2018.)
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=20257>
(pristup: 1.3.2018.)
- Hrvatski jezični portal* http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=d11vXRc%3D&keyword=računalo
(pristup: 22.2.2018.)
http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=e1ZuWhg%3D&keyword=laser
(pristup: 5.3.2018.)
http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=fFdiURQ%3D&keyword=gigabajt
(pristup: 6.6.2018.)
- STRUNA* <http://struna.ihjj.hr/naziv/kvantitativne-metode/21157/#naziv>
(pristup: 19.2.2018.)
http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=e1lhURY%3D&keyword=modulacija
(pristup: 5.3.2018.)
<http://struna.ihjj.hr/naziv/georeferenciranje/1743/>
(pristup: 16.5.2018.)

<https://vimeo.com/170699480> (pristup: 2.3.2018.)

<https://vimeo.com/66955158> (pristup: 2.3.2018.)

<https://www.vi-mm.eu/2017/03/13/athens-time-walk-a-virtual-experience-back-in-time/> (pristup: 29.5.2018.)